

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

Marco Antônio Castelo Branco
MATRÍCULA: 2114132/6

Aproveitamento energético de biogás de ETE.

Brasília
2017



MARCO ANTÔNIO C. BRANCO

Aproveitamento energético de biogás de ETE.

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB– Centro Universitário de
Brasília

Orientador: Eng° Civil André Braga G.
Silveira, M.Sc.

Brasília
2017

MARCO ANTÔNIO C. BRANCO

Aproveitamento energético de biogás de ETE.

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia Civil
do UniCEUB– Centro Universitário de
Brasília

Orientador: Engº Civil André Braga G.
Silveira, M.Sc.

Brasília, 2017.

Banca Examinadora

Engº. Civil André Braga G. Silveira, M.Sc.
Orientador

Engª. Civil Maruska T. N. S. Bueno, D.Sc.
Examinador(a) Interno

Engº. Civil Sergio Brasil Abreu, D.Sc.
Examinador(a) Externo

RESUMO

O presente trabalho destina-se a dissertar sobre o aproveitamento energético do biogás oriundo das estações de tratamento de esgoto (ETE), e ao longo deste será explicitado o conceito de Biogás, sua composição, origem, riscos, o programa PROBIOGÁS, os principais tipos de digestores utilizados em estações de tratamento de esgoto e então será explicado como o biogás pode vir a ser uma solução viável para que assim tenhamos modelos sustentáveis de tratamento de esgoto.

Esse aproveitamento energético se dá com a queima do biogás que é produzido nos digestores e biodigestores de ETE, pois o biogás é composto principalmente do gás metano que é altamente inflamável, fator esse que o torna uma boa alternativa de combustível para geradores de energia. A manipulação desse gás não é algo simples de ser feito, mas já existem diversos modelos de plantas para estações de tratamento que têm o propósito de aproveitar o biogás, e em vários países esse já é o modelo mais adotado para as ETE, sendo um sistema que paga os custos de implantação com a geração de energia e que reduz a emissão de gases nocivos ao meio ambiente o que resulta por fim em um sistema sustentável de tratamento do esgoto.

Palavras-chave: Biogás, aproveitamento energético, estações de tratamento de esgoto.

ABSTRACT

The present work is intended to discuss the energy use of biogas from wastewater treatment plants (WWTP), and along this it will be explained the concept of biogas, its composition, origin, risks, the PROBIOGÁS program, the main types of digesters used in WWTP and then it will be explained how biogas can be a viable solution so that we have sustainable models of sewage treatment.

This energy use is due to the burning of the biogas that is produced in the digesters and biodigestors of WWTP, because the biogas is composed mainly of the methane gas that is highly flammable, a factor that makes it a good alternative fuel for power generators . The manipulation of this gas is not a simple thing to do, but there are already several models of WWTP that have the purpose of taking advantage of biogas, and in several countries this is already the most adopted model for WWTP, being a system that pays implementation costs with the generation of energy and reduces the emission of harmful gases to the environment which ultimately results in a sustainable sewage treatment system.

Keywords: Biogas, energy use, wastewater treatment plants.

RESUMEN

Este trabajo está destinado a discutir el uso de energía del biogás derivados de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), y se explicará el concepto de biogás, su composición, origen, riesgos, el programa PROBIOGAS, los principales tipos de digestores utilizados en las PTAR y así se explicará como el biogás podría ser una solución viable para que tengamos modelos sostenibles de tratamiento de aguas residuales.

Este es el uso de energía con la quema del biogás que se produce en los digestores y biodigestor de biogás em PTAR porque ello se compone principalmente de gas metano, que es altamente inflamable, un factor que hace que sea un buen combustible alternativo para los generadores de energía. El manejo de este gas no es algo sencillo de hacer, pero ya hay muchos planes para las plantas de tratamiento que tenga por objeto aprovechar el biogás, y en muchos países esto ya es el modelo más ampliamente adoptado para lãs PTAR, siendo un sistema que paga los costos de implementación con la generación de energía y por reducir la emisión de gases nocivos para el medio ambiente que resulta finalmente en un sistema sostenible de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: biogás, uso de energía, plantas de tratamiento de aguas residuales.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	01
ÍNDICE DE TABELAS	03
ÍNDICE DE ABREVIACÕES.....	05
ÍNDICE DE SÍMBOLOS	06
1 INTRODUÇÃO.....	07
2 OBJETIVOS.....	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 BIOGÁS	11
3.1.1 PROBIOGÁS.....	12
3.2 Estações de tratamento de esgoto	14
3.2.1 Pré-tratamento.....	15
3.2.2 Tratamento primário.....	17
3.2.3 Tratamento secundário.....	19
3.3 Geração de energia em ETE.....	21
3.3.1 Principais tecnologias para a produção de biogás.....	22
3.3.1.1 Reator UASB.....	22
3.3.1.2 Digestor de lodo.....	25
3.3.2 Sistema de queima do biogás.....	27
3.3.3 Tratamento do biogás.....	28
3.3.4 Transporte, manobra, monitoramento e armazenamento do biogás.....	33
3.3.5 Unidades motor gerador.....	41
4 METODOLOGIA DO PROBIOGÁS	44
4.1 Identificação da energia gerada.....	44
4.2 Plantas com aproveitamento energético de biogás	45
4.3 Discriminação da região e população do atendimento da ETE.....	46
4.4 Levantamento das obras de implantação da ETE.....	47

4.5 Levantamento de equipamentos	49
4.6 Levantamento das despesas com operação e manutenção.	53
4.7 Levantamento da receita com a geração de energia elétrica.....	56
5 METODOLOGIA	58
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	60
6.1 Custos totais obras civis e equipamentos - CAPEX.....	60
6.2 Custos totais com operação e manutenção - OPEX.....	61
6.3 Receitas com a geração de energia	62
6.4 Fluxos de caixa no cenário base.....	63
6.5 Levantamento do tempo estimado do “Payback”	67
7 CONCLUSÃO.	70
8 SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS.....	72
9 BIBLIOGRAFIA	73
ANEXO I – Cálculos para obtenção da vazão do biogás	77

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – Tipologia da geração de energia no Brasil.....	08
FIGURA 2 – Banco de informações da geração	08
FIGURA 3 – Logotipo do projeto PROBIOGÁS.....	12
FIGURA 4 – Desenho esquemático de uma ETE comum	15
FIGURA 5 – Gradeamento ETE Ponta Negra, Natal/RN e João Câmara/RN.....	16
FIGURA 6 – Caixas de areia ETE Ponta Negra e KM6 Natal/RN	17
FIGURA 7 – Decantador primário	18
FIGURA 8 – Desenho esquemático de um decantador primário.....	18
FIGURA 9 – Tanque de aeração aberto.....	19
FIGURA 10 – Difusores de oxigênio	20
FIGURA 11 – Aeradores	20
FIGURA 12 – Visão aérea de reatores UASB.....	23
FIGURA 13 – Desenho esquemático reator UASB	24
FIGURA 14 – Digestor de lodo, ETE Ribeirão Preto/SP	25
FIGURA 15 – Desenho esquemático digestor de lodo.....	26
FIGURA 16 – Tipos de queimadores, Esq. Aberto, Enclausurado e Dir. Semi- enclausurado	28

FIGURA 17 – Junta de expansão (esquerda) e registro (direita)	33
FIGURA 18 – Separador de sedimentos com dreno (esquerda) desenho esquemático de um filtro para remoção de sedimentos e condensados (direita)	34
FIGURA 19 – Válvula reguladora de pressão (esquerda) selo hídrico (direita).....	35
FIGURA 20 – Tipo Vórtex (esquerda) mássico por dispersão térmica (direita).....	38
FIGURA 21 – Medidor de composições de biogás.....	38
FIGURA 22 – Membranas com lastro (esquerda) Balão de lona (direita)	40
FIGURA 23 – Tubos infláveis (esquerda) membra dupla com ar comprimido (direita)	40
FIGURA 24 – Membrana dupla Arrudas/BH (esquerda) Tubos infláveis Alemanha (direita).....	41
FIGURA 25 – Instalação completa com contêineres (esquerda) motor a gás da Dreyer & Bosse Krafwerke GmbH (direita)	43
FIGURA 26 – Motor a gás da GE Distributed Power.....	43
FIGURA 27 – Correlação entre o tipo de energia e a fonte geradora	44
FIGURA 28 – Arranjo com reator UASB	45
FIGURA 29 – Arranjo com digestor de lodo	45
FIGURA 30 – Gráfico, tarifas médias de energia elétrica no ano de 2015.....	57
FIGURA 31 – Gráfico comparativo entre os custos com OPEX.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – Composição do biogás processado em um biodigestor	11
TABELA 2 – Correlação impurezas e tecnologias de tratamento.....	30
TABELA 3 – Comparação das principais tecnologias de purificação de biogás.....	32
TABELA 4 – Diferentes tecnologias de medição de vazão, vantagens e desvantagens	37
TABELA 5 – Parâmetros a serem monitorados em uma planta de aproveitamento de biogás	39
TABELA 6 – Comparação entre motogeradores a gás, ciclo Otto e Diese	42
TABELA 7 – Premissas do estudo	46
TABELA 8 – Custos unitários de obras civis	47
TABELA 9 – Quantitativos dos serviços de obras civis	48
TABELA 10 – Custos CAPEX – Obras civis.....	48
TABELA 11 – Quantidades e custos unitários de equipamentos	49
TABELA 12 – Custos CAPEX - Equipamentos	51
TABELA 13 – Quantitativo dos itens considerados para determinação de OPEX e custos unitários.....	53
TABELA 14 – Custos OPEX anuais	54
TABELA 15 – CAPEX em R\$.....	60

TABELA 16 – OPEX em R\$	61
TABELA 17 – Demonstração dos valores de receita	63
TABELA 18 – Fluxo de caixa arranjo DP-LAC-DL.....	64
TABELA 19 – Fluxo de caixa arranjo DP-LAC-DL-GAS	65
TABELA 20 – Fluxo de caixa arranjo UASB-LAC.....	66
TABELA 21 – Fluxo de caixa arranjo UASB-LAC-GAS.....	67
TABELA 22 – Fluxo de caixa do sistema de aproveitamento do biogás com digestor de lodo	68
TABELA 23 – Fluxo de caixa do sistema de aproveitamento do biogás com reator UASB.....	69
TABELA 24 – Características do esgoto e vazão de projeto.....	77
TABELA 25 – Resultado do decantador primário.....	78
TABELA 26 – Resultados tanque de aeração após decantador primário.....	78

ÍNDICE DE ABREVIACÕES

ANEEL.....	Agência Nacional de Energia Elétrica
BDI.....	Bonificações e Despesas Indiretas
CHP.....	Combinado de calor e poder
CSTR.....	Recipiente de tanque agitado com fluxo contínuo
DBO.....	Demanda Bioquímica de Oxigênio ou Demanda Biológica
DEA.....	Dietanolamina
DQO.....	Demanda Química de Oxigênio
ETA.....	Estação de Tratamento de Água
ETE.....	Estação de Tratamento de Esgoto
GIZ.....	Sociedade Alemã para a Cooperação Internacional
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAP.....	Lavagem com Água Pressurizada
MDEA.....	Metildietilamina
MEA.....	Monoetanolamina
NBR.....	Norma Brasileira Reguladora
PCI.....	Poder Calorífero Inferior
PEAD.....	Polietileno de Alta Densidade
RN.....	Resolução Normativa
SIGEL.....	Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico
TEA.....	Trietanolamina

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

°C.....	Grau Celsius
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
GW.....	Gigawatt
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S.....	Sulfeto de hidrogênio
kW.....	Quilowatt
MW.....	Megawatt
N ₂	Nitrogênio
NH ₃	Amônia
O ₂	Oxigênio
pH.....	Potencial Hidrogeniônico
W.....	Watt

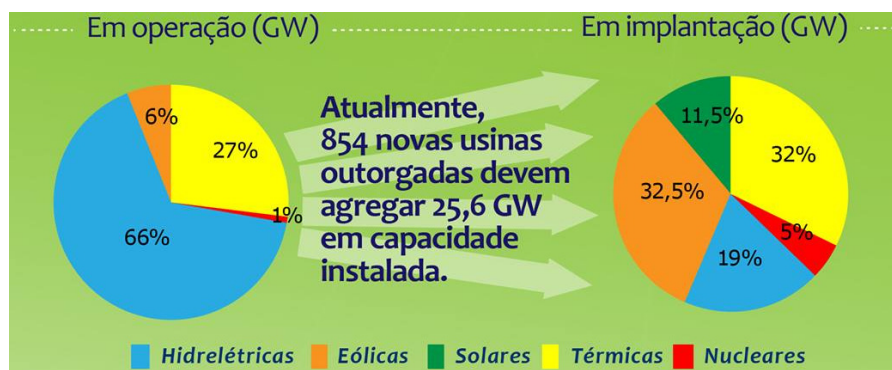
1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande produtor de energia elétrica, parte dessa produção abastece a demanda interna e em algumas usinas a produção excedente é vendida, auxiliando a demanda externa dos países vizinhos. Essa energia vem principalmente das chamadas fontes renováveis (figura 1) onde se enquadram as fontes: hídrica, biomassa, eólica, solar.

Segundo informações disponibilizadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), as fontes renováveis estão cada dia tomando mais espaço no Brasil, e essa tem sido uma tendência mundial, pois o mundo tem visto os danos ambientais causados pela queima dos combustíveis fósseis e pelos vazamentos nas usinas nucleares. Obviamente, isso também não significa que as fontes renováveis sejam inofensivas ao meio ambiente: - por exemplo, as usinas hidrelétricas, para garantirem um melhor funcionamento, alagam uma grande área fazendo assim com que se formem grandes reservatórios.

Ainda assim, a principal vantagem de se utilizar as fontes renováveis é que essas são recursos naturais e sua utilização não compromete a disponibilidade destes no futuro, como, por exemplo: água, vento, irradiação solar, bagaço da cana de açúcar, lodo etc. Nem gás natural, nem carvão mineral, nem petróleo entram como renováveis porque seus processos naturais de transformação demoram milhares de anos para acontecer.

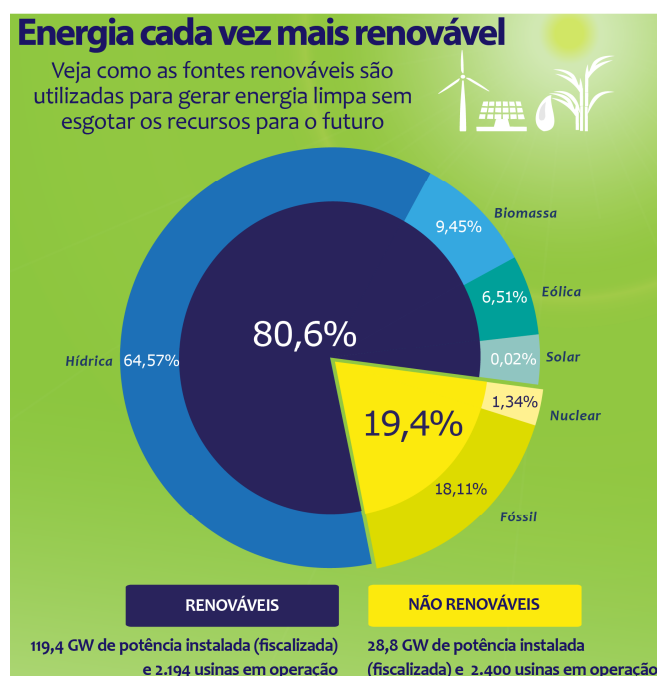
Figura 1 - Tipologia da geração de energia no Brasil



Fonte: ANEEL, 2016

Seguindo essa tendência de fontes renováveis que sejam inofensivas ao meio ambiente, descritas na Figura 2, não se pode esquecer também do viés econômico, ou seja, essas fontes de energia têm que ser viáveis também no âmbito financeiro, ou seja, em tese, nenhuma fonte de energia nova que não seja economicamente atraente será aceita pela sociedade, até por que esse fator é primordial para determinar se a alternativa será viável e sustentável.

Figura 2 - Banco de informações da geração



Fonte: ANEEL, 2016

Tendo em vista que essa matriz energética brasileira pode ser melhorada ao longo dos anos, até mesmo para acompanhar as tendências dos países mais desenvolvidos, que utilizam cada vez mais fontes renováveis, foi fomentada no Brasil a indústria do aproveitamento energético do biogás, podendo ser esse oriundo do tratamento de esgotos, dos resíduos sólidos urbanos e das atividades agrícolas.

Esse trabalho visa pôr em discussão o aproveitamento energético do biogás produto do tratamento dos esgotos urbanos, para saber se esse sistema é viável técnico-economicamente, e sustentável, tanto no âmbito financeiro quanto no âmbito de preservação do meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta monografia tem como objetivo demonstrar que o sistema de aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto urbano é viável e sustentável.

2.2 Objetivos específicos

- Explicitar o conceito de biogás, sua composição e formação;
- Esclarecer sobre o projeto PROBIOGÁS;
- Trazer os principais biodigestores utilizados em ETE, explicar o funcionamento e demonstrar como esses são utilizados em plantas de geração de energia;
- Demonstrar que esse sistema é menos nocivo ao meio ambiente comparado a outros modelos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biogás

O biogás é uma mistura de gases produto da decomposição de matéria orgânica. Para que isso ocorra são necessários diversos microrganismos que, para degradarem matéria orgânica, dependem de vários fatores, como pH, temperatura, o tipo de substrato, que podem ser restos de alimentos, frutas e vegetais, esterco de animais, bovinos, suínos, aves, ovinos, caprinos e até mesmo de humanos dentre outros. Os principais gases oriundos desse processo são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), gases esses que quando liberados na atmosfera contribuem para o efeito estufa, ou seja, se não aproveitados são prejudiciais para o meio ambiente.

Além dos gases metano e dióxido de carbono, o biogás em média é composto por outros tipos de gases, apresentados na tabela a seguir, tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás processado em um biodigestor

PARÂMETROS	BIOGÁS TÍPICO (%)
CH_4	40 – 75
CO_2	25 – 40
N_2	0,5 – 2,5
O_2	0,1 – 1
H_2S	0,1 – 0,5
NH_3	0,1 – 0,5
H_2	1 – 3
CO	0 – 0,1

Fonte: CASTANÓN, (2002)

Retomando o que foi dito no parágrafo anterior sobre os fatores que influenciam na produção do Biogás é importante ressaltar, que o PH de um líquido indica seu potencial de corrosão, possibilitando avaliar a quantidade de reagentes necessários para a coagulação e manutenção da vida dos micro-organismos ali presentes. Devido a isso é recomendado manter o pH abaixo de sete (ácido), mas não muito abaixo disso. A temperatura é outro fator que se não controlado devidamente pode vir a causar a ineficiência de todo o processo enzimático das bactérias que formam o gás metano: a 10°C as bactérias apresentam baixa atividade e acima de 65°C ocorre a destruição das enzimas, ou seja, para uma produção mais eficiente a temperatura deve ser mantida entre 32 e 37°C no caso de bactérias mesofílicas (ativas a temperaturas ambiente), e no caso de bactérias termofílicas (ativas em altas temperaturas), que são mais tolerantes à altas temperaturas deve-se manter uma temperatura entre 50 à 60°C (APPELS et al., 2008).

Dependendo da utilização final do biogás será então definida a qualidade que esse deverá ser entregue, uma vez que esse produto sofre um processo de limpeza e purificação. Por exemplo, quando utilizado para queima deve-se isolar o gás metano fazendo assim o aumento do potencial calorífico e emitindo menos gases de efeito estufa na atmosfera.

3.1.1 PROBIOGÁS

Figura 3 – Logotipo do projeto PROBIOGÁS



Fonte: Brasil, 2015

O PROBIOGÁS é um projeto de parceria entre o Brasil e a Alemanha que visa incentivar o aproveitamento energético de biogás no Brasil. Tem como principal objetivo a ampliação do uso energético eficiente do biogás no que se refere a saneamento básico e também em iniciativas agropecuárias e agroindustriais. Isso faz com que o biogás e o biometano sejam inseridos na matriz energética brasileira definitivamente, uma vez que essa fonte é considerada renovável e que com a queima desses compostos geram-se benefícios para o meio ambiente, contribuindo para a redução de emissões dos gases indutores do efeito estufa na atmosfera.

O projeto atua em diversos setores para que assim atinja seus objetivos, seja no setor legislativo, onde atua pelas melhorias das condições regulatórias, na educação, com a realização de congressos, palestras, pesquisas e treinamentos técnicos, e também na indústria nacional de biogás, para desenvolvimento nacional de tecnologias e intercâmbio de conhecimento entre as empresas alemãs e as brasileiras.

Os dois países têm um acordo de cooperação técnica elaborada por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, Governo brasileiro, e da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Governo alemão, com foco principal no aproveitamento do biogás produto do tratamento anaeróbio dos esgotos sanitários, dos resíduos sólidos urbanos, agropecuários e dos efluentes agroindustriais.

A Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ), apoia o Governo Federal da Alemanha em seus objetivos referentes às áreas de cooperações internacionais para desenvolvimento sustentável em diversos países. No território brasileiro, essa Agência Alemã se posiciona principalmente em dois temas: a proteção e o uso sustentável dos recursos naturais, eficiência energética e a inclusão de mais fontes renováveis na matriz energética.

3.2 Estações de tratamento de esgoto

Para coletar e tratar os esgotos sanitários de uma população, as concessionárias de serviços de águas e esgotos sanitários operam utilizando-se de redes de coleta de esgoto e estações de tratamento de esgotos (ETE).

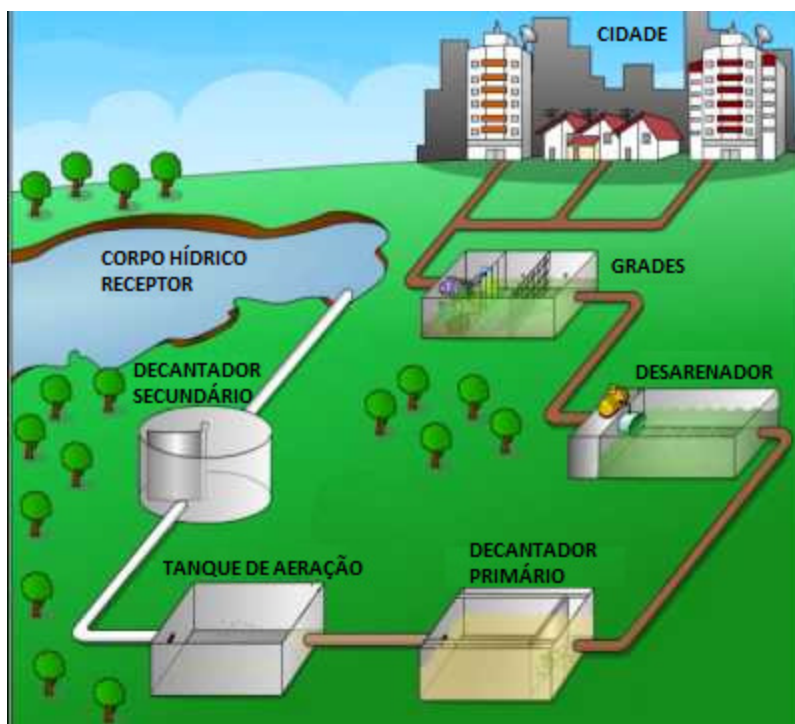
Esgoto, efluente ou águas servidas são todos os resíduos líquidos domésticos e também industriais que necessitam de um tratamento adequado para retornar a natureza sem causar graves impactos ao meio ambiente, ou à saúde da população humana. Sendo assim, se faz necessário levar os esgotos a unidade específica que melhore a qualidade do efluente (ETE), de modo a reduzir o impacto do lançamento do esgoto no corpo receptor.

Apesar de a própria natureza, em seus corpos hídricos (rios, lagos e mares) ter capacidade de decompor matéria orgânica (por meio de processos de autodepuração), isso exigiria muito tempo e demandaria grandes corpos hídricos, uma vez que a população produz uma quantidade que supera essa capacidade de depuração da natureza. Por isso se faz necessário o uso das estações de tratamento de esgoto.

A ETE remove as cargas poluentes desses efluentes por meio de processos físicos, químicos e biológicos, devolvendo ao meio ambiente um efluente que se enquadra nos padrões estabelecidos pela legislação ambiental.

A imagem abaixo, figura 4, é um desenho esquemático de como é o funcionamento de uma estação de tratamento de esgoto urbano (há diversos modelos possíveis). O tratamento de esgotos domésticos é dividido em pré-tratamento (grades e desarenador), tratamento primário e secundário e só depois disso o esgoto é lançado no corpo hídrico receptor. Há também processos de tratamento avançados e terciários, não abordados neste trabalho.

Figura 4 – Desenho esquemático de uma ETE comum



Fonte: SABESP, 2013

3.2.1 Pré-tratamento

Nessa primeira etapa também chamada de tratamento preliminar temos um conjunto de unidades que atuam a fim de remover os resíduos sólidos mais grosseiros, e também as partículas de areia. Estes sólidos influenciam negativamente para uma boa eficiência do processo de tratamento do efluente, uma vez que esses podem acabar ocasionando entupimentos e obstruções nas unidades subsequentes. A remoção dos sólidos retidos pode ser feita de maneira manual, mecanizada ou um composto das duas maneiras.

Apesar de o esgoto ser formado em grande parte por água e matéria orgânica dissolvida, existe uma expressiva ocorrência de sólidos grosseiros que são lançados

indevidamente nas redes coletoras, a exemplo de tecidos, preservativos, fraldas descartáveis, absorventes etc.

Na etapa de gradeamento, como podemos ver nas imagens abaixo, os sólidos grosseiros ficam retidos e periodicamente são removidos e encaminhados aos aterros sanitários para disposição final. As características e dimensões desses resíduos sólidos variam de acordo com os vãos entre as barras das grades. A NBR 12209:2011 traz recomendações importantes acerca do projeto destas unidades.

Figura 5 – Gradeamento ETE Ponta Negra, Natal/RN e João Câmara/RN



ETE Ponta Negra, Natal/RN

ETE João Câmara, João Câmara/RN

Fonte: ACS CAERN, 2014

Depois do gradeamento temos o processo de remoção de partículas em suspensão, onde se faz mais presente partículas de areia (por isso as unidades são chamadas de desarenadores ou caixas de areia). Esses sólidos, constituídos por siltes, argilas, pequenas pedras e outros materiais inorgânicos sedimentam em unidades conforme as imagens abaixo. Suas velocidades de sedimentação são relativamente altas, e isso faz com que as caixas de areia sejam dimensionadas com curto tempo de retenção. O material sedimentado é recolhido e normalmente encaminhado aos aterros sanitários para disposição final.

Figura 6 – Caixas de areia ETE Ponta Negra e KM6 Natal/RN



ETE Ponta Negra, Natal/RN

ETE KM6, Natal/RN

Fonte: ACS CAERN, 2014

3.2.2 Tratamento primário

Após o tratamento preliminar o esgoto já começa a apresentar um aspecto mais uniforme, uma vez que praticamente todo o resíduo sólido foi removido. Então é dado início ao tratamento primário, cujo objetivo é separar a matéria poluente diluída na água e reduzir sua concentração.

A eficiência depende do tipo de unidade de tratamento adotada e da operação desta. Sendo mais comum em ETE o uso de decantadores primários, como o da imagem abaixo, onde o fluxo é lento, o que permite que os sólidos em suspensão, com densidades maiores que a água, precipite e fiquem acumulados no fundo dos tanques, tornando se assim uma massa chamada de lodo primário bruto.

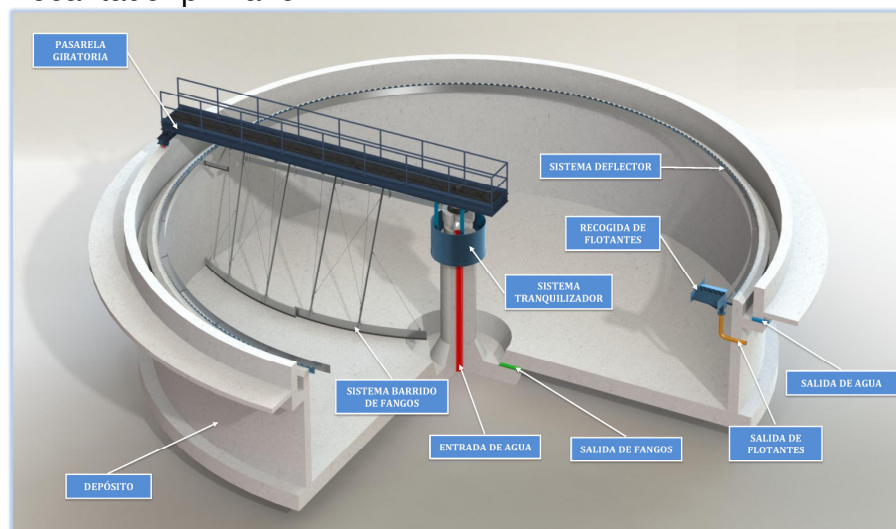
Figura 7 – Decantador primário



Fonte: BISHEN, 2017

Esse lodo primário bruto é retirado dos tanques por meio de raspadores mecânicos e bombas como mostrado no desenho esquemático do decantador primário logo abaixo. O que for menos denso que a água, como graxas, óleos e outros ficarão na superfície da água e também são removidos e levados para o devido tratamento/destinação final.

Figura 7 – Decantador primário



Fonte: OMNIA, 2017

3.2.3 Tratamento secundário

No esquema mostrado, o tratamento secundário é composto de tanque de aeração e decantador secundário. Essa unidade é responsável por formar os micro-organismos ativos, esses por sua vez responsáveis pela digestão da matéria orgânica presente no efluente. Os tanques ilustrados nas imagens abaixo fornecem as condições ideais quanto à demanda bioquímica de oxigênio (DBO) necessária para estabilizar a matéria orgânica.

Figura 9 – Tanque de aeração aberto



Fonte: EFLUENTES, 2017

O oxigênio é injetado nos tanques por meio de difusores posicionados no fundo do tanque ou aeradores posicionados na superfície do tanque, ilustrados mais abaixo.

Figura 10 – Difusores de oxigênio



Fonte: CONSERV, 2015

Figura 11 – Aeradores



Fonte: CONSERV, 2015

Depois de passar o tempo de detenção hidráulica nos tanques de aeração o efluente segue para o decantador secundário ainda com elevada concentração de sólidos. Neste decantador o esgoto novamente é sedimentado, parte do lodo ativado é redirecionada para o tanque de aeração, e a outra parcela segue para o

tratamento específico e destinação final, essa parcela é chamada de lodo biológico excedente.

O decantado secundário deve ser dimensionado para a vazão média acrescida da vazão de recirculação. Uma boa floculação é necessária para que se tenha a recuperação dos sólidos em elevação no decantador secundário, fazendo assim com que se tenha um efluente final de melhor qualidade.

3.3 Geração de energia em ETE

A geração de energia em ETE no Brasil vem se tornando uma alternativa atrativa, ainda mais depois da resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 482 de 2012. Essa resolução veio para estabelecer as condições gerais a serem seguidas no que diz respeito à micro e mini gerações de energia elétrica ligadas na rede de distribuição no território brasileiro. Sendo assim as concessionárias de energia elétrica tiveram que revisar e elaborar novas normas técnicas a respeito.

O destaque dessa resolução foi a proposta de um sistema de compensação. Esse sistema permite que o consumidor que estiver gerando energia elétrica, micro ou mini geração, possa gerar créditos que podem ser abatidos no seu consumo de energia. Ou seja, créditos proporcionais à sua geração serão abatidos no débito que este tiver com a concessionária.

Já em novembro de 2015, foi publicada uma nova resolução normativa da ANEEL nº 687. Essa veio como uma modificação à RN nº 482, alterando os antigos parâmetros de definição de micro e mini geração e também quanto a utilização dos créditos concedidos por essa geração de energia elétrica.

A micro geração distribuída teve o limite de potência instalada reduzido de 100 kW para 75 kW, a mini geração distribuída teve o limite de potencia instalada

aumentada de 1MW para 3MW, isso para fontes hídricas, no caso de cogeração ou conversão energética de outras fontes o limite passou para 5MW.

Ampliou-se também a possibilidade de compensação de créditos para outras unidades consumidoras, anteriormente era limitado para apenas unidades onde o CPF ou CNPJ fossem os mesmos da unidade geradora, agora com a nova resolução é possível transferir percentuais desses créditos para outras unidades consumidoras cadastradas em CPF ou CNPJ diferentes.

Para as atividades desenvolvidas em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) a geração de energia distribuída vem a ser uma oportunidade para redução de custos com a operação e diminuição das emissões de gases indutores do efeito estufa.

3.3.1 Principais tecnologias para a produção de biogás em ETEs

O biogás é um subproduto gerado em ETEs através da degradação da matéria orgânica presente no esgoto ou lodo. As principais tecnologias para a produção de biogás em ETEs são os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) e os digestores de lodo.

Logo em seguida serão apresentadas as principais características dessas duas tecnologias, os reatores UASB e os digestores de lodo para o tratamento de esgotos sanitários. Dentre as tecnologias anaeróbias essas duas são as que mais se destacam pelo alto potencial de geração de biogás.

3.3.1.1 Reatores UASB

As características hidrodinâmicas de fluxo ascendente dos reatores UASB, faz com que o tempo de retenção da biomassa no interior desse seja relativamente baixo no que se refere à detenção hidráulica do efluente, não deixando de ser um tempo de retenção celular elevado o suficiente. Esse tempo de retenção varia de 6 a 10 horas, com eficiência de remoção de carga orgânica (DQO) variando entre 60 e

70% e concentração de metano no biogás variando entre 60 e 85% v/v (Brasil, 2015).

Os reatores UASB necessitam que o efluente tenha um tratamento prévio. Para um funcionamento eficaz, o esgoto deve ser submetido às etapas de gradeamento e de desarenação, com intuito de remover detritos que são prejudiciais ao funcionamento dos reatores.

Em uma ETE, esses reatores UASB ilustrados conforme imagem abaixo concentram sozinhas as funções de decantador primário e secundário, reator biológico e digestor da biomassa formada.

Figura 12 – Visão aérea de reatores UASB



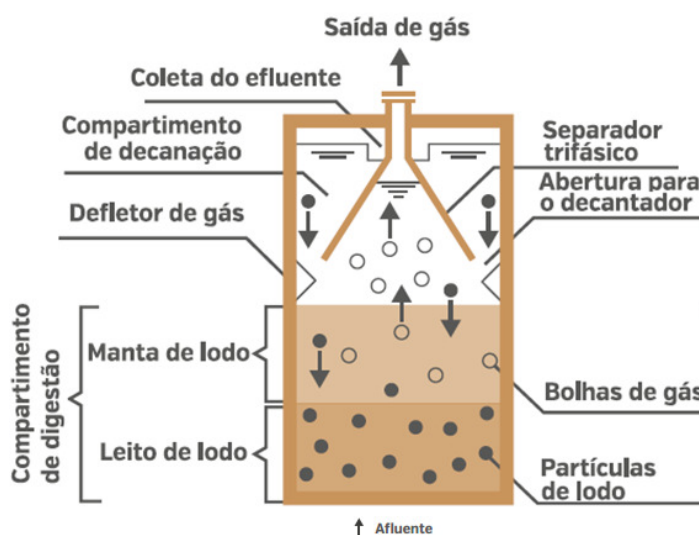
Fonte: Brasil, 2015

O desenho esquemático a seguir, Figura 13, demonstra como esse reator funciona, o esgoto afluente entra pelo fundo por um sistema de distribuição, seguindo assim um fluxo ascendente pelo leito e camada de lodo, onde acontece a digestão anaeróbia (sem presença de oxigênio). A manta de lodo é composta por microrganismos, que formam flocos suspensos. O efeito da floculação da biomassa

resulta em características que favorecem a sedimentação e a permanência dela no reator, com tempo de retenção celular elevado o suficiente para estabilizar a biomassa.

Depois da degradação da matéria orgânica, os outros produtos dessa digestão, o efluente tratado, o biogás e a biomassa devem ser separados. A maior parte da biomassa é mantida na parte inferior do reator, por causa da adesão dos flocos e sedimentação, outra parte pode ser deslocada para o separador trifásico.

Figura 13 – Desenho esquemático reator UASB



Fonte: Adaptado Brasil, 2015

No entorno e acima do separador trifásico está a saída para a unidade de decantação, em razão de que as partículas mais pesadas da biomassa descem enquanto as mais leves são encaminhadas junto com o efluente tratado. As bolhas de gás sobem em fase líquida até ficar em contato com a camada líquido-gás, no interior do separador trifásico (para que essas sejam direcionadas até esse compartimento são utilizados os defletores de gás). A retirada desse gás do reator é feita por meio de tubulação própria.

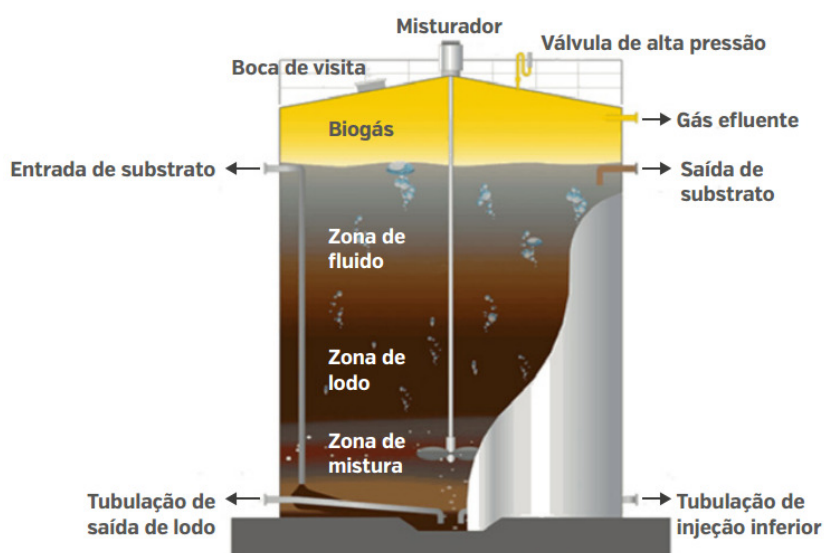
3.3.1.2 Digestor de lodo

Os digestores de lodo são utilizados em ETEs principalmente para estabilização de lodos ativos, primários e secundários, produto do tratamento de esgotos. Esse processo de estabilização reduz o volume a ser encaminhado para a disposição final e possibilita o aproveitamento da energia bioquímica.

Essa tecnologia ilustrada na figura abaixo corresponde a uma CSTR (Continuous Flow Stirred Tank Reactor), reatores de mistura contínua. O que significa que o tempo de detenção hidráulica corresponde ao tempo de retenção celular.

A figura 14 demonstra como esse digestor de lodo funciona. Ele é alimentado de forma contínua, ou quase contínua, e o lodo é mantido no seu interior por um determinado período, chamado tempo de detenção.

Figura 14 – Desenho esquemático digestor de lodo



Fonte: Brasil, 2015

Na prática, esses digestores anaeróbios são dimensionados com o tempo de detenção acima do ótimo, pois a hidrólise desses sólidos pode vir a se tornar a etapa limitante de todo esse processo. Essa taxa de hidrólise pode ser afetada por fatores como temperatura, composição do substrato, tamanho das partículas etc.

O tipo de arquitetura ovoide possui vantagens quanto à mistura, retenção de calor e captação de biogás. Apesar disso, o mais comum é a forma cilíndrica, pois possui um custo de construção significativamente mais econômico. Ambos os tipos estão mostrados na figura 15.

Figura 15 – Digestor de lodo, ETE Ribeirão Preto/SP



Fonte: Brasil, 2015

A digestão de lodo pode ser realizada no regime termofílico ou no mesofílico, o mais comum é o mesofílico. A ausência de isolamento e aquecimento deve ser considerado em projeto, e sendo assim a detenção hidráulica deve ser maior, em torno de 40 dias. Na ETE de Ribeirão Preto/SP (figura 15), o lodo é aquecido antes da entrada no digestor.

O adensamento do lodo é fundamental, já que o dimensionamento é feito diretamente através do tempo de detenção hidráulica. Um lodo com 3% de sólidos

exige o dobro do tamanho que um digestor de lodo com 6%, ficando assim claro que o adensamento influencia diretamente na viabilidade econômica do projeto.

Esse tipo de reator necessita de uma bomba misturadora, pois essa vai garantir a eficiência desse processo. Existem as bombas externas de recirculação e bombas internas para misturar esse substrato.

Quanto à captação do biogás no digestor de lodo, é considerada mais simples do que em reatores UASB, pois o ponto de captação geralmente é centralizado em um só ponto.

3.3.2 Sistema de queima do biogás

Os sistemas de queima de biogás, queimadores ou flares, são indispensáveis em ETEs com digestão anaeróbia, sendo assim, em estações com reatores UASB e digestores de lodo com ou sem aproveitamento energético, dever-se ter, por medida de segurança a instalação de um sistema de queima que visa reduzir os impactos ambientais. Quando há o aproveitamento do biogás os queimadores são acionados quando o biogás é produzido em excesso, ou quando em função de falhas operacionais ou manutenção onde o biogás produzido deve ser descartado.

Existem três tipos de queimadores hoje no mercado: os abertos, enclausurados (fechado) e semi-enclausurados, ilustrados abaixo. A vantagem do aberto é que a chama fica aparente, portanto é mais fácil visualizar se está funcionando corretamente. Em queimadores enclausurados, a chama fica dentro de uma câmara de combustão e isso garante que chegue a temperaturas mais altas. Os semi-enclausurados combinam características dos dois queimadores.

Figura 16 – Tipos de queimadores, Esq. Aberto, Enclausurado e Dir. Semi-enclausurado



Fonte: SUSTENTARE, 2016

Os projetos de sistema de queima devem ser dimensionados para uma capacidade igual ao volume máximo de biogás produzido. A NBR 12.209 prevê a instalação de dois queimadores para ETEs com capacidade acima de 250 L/s de vazão média de esgoto e sem aproveitamento energético de biogás. A distância segura prevista entre o queimador e o digestor prevista na norma de 1992 é de no mínimo 30 metros, e a distância mínima entre outra edificação deve ser de 20 metros no mínimo.

3.3.3 Tratamento do biogás

Como elucidado anteriormente o biogás é uma composição de gases. Dentre eles, os principais são: metano, dióxido de carbono, sulfídrico e amônia. Dependendo da finalidade de sua utilização, são necessárias algumas tecnologias que tratem o biogás.

Por exemplo. Para utilização como fonte de energia elétrica é necessário remover as principais impurezas como umidade, siloxanos e principalmente o gás sulfídrico.

Em caso de utilização em motores estacionários a gás (CHP), a temperatura máxima do biogás não pode ser maior que 40°C, pois temperaturas mais elevadas prejudicariam a vida útil das membranas da linha de controle e a regulação de gás e por consequência a eficiência do motor. O poder calorífico inferior deve estar entre 4,5 kWh/Nm³ e 7,0 kWh/Nm³ (45% a 70% de metano e o restante de dióxido de carbono), com a possibilidade de compensar variações do poder calorífico inferior a +/- 1%/30s por sistemas de regulação, segundo dados dos fabricantes desses motores (Brasil, 2015).

O poder calorífico é a propriedade que um combustível tem de gerar calor, definido em unidades de energia por unidade de massa, ou quando o combustível for líquido ou gasoso, essa relação se dá por unidade de volume. O Poder Calorífico Superior representa o calor liberado pela combustão, tendo toda a água resultante na fase líquida e o Poder Calorífico Inferior representa o calor liberado pela combustão, estando toda a água resultante no estado gasoso.

Quanto à umidade relativa do biogás o ideal é não superar 80%, pois isso garante uma margem segura do ponto de orvalho. Para evitar a condensação o ponto de orvalho deverá ficar dentro dos limites, especialmente na linha de controle, na regulação de gás e compressor (Brasil, 2015).

A concentração significativa de gás sulfídrico pode ocasionar na formação de ácido sulfídrico no bloco dos motores, desencadeando a corrosão dos mancais de deslizamento, reduzindo também a vida útil do óleo.

A tabela abaixo faz uma relação entre as impurezas do biogás produzido e as tecnologias necessárias para o tratamento de purificação deste.

Tabela 2 – Correlação impurezas e tecnologias de tratamento.

	TUBULAÇÃO NO SOLO COM PURGADOR DE VAPORES	ADSORÇÃO PARA SECAGEM	RESFRIAMENTO	FILTRO DE GÁS	COMPRESSOR	ÓXIDO DE FERRO	DOSAGEM DE FERRO SIMULTÂNEA	BIODESSULFURIZAÇÃO	ÓXIDO DE ZINCO	SODA CÁUSTICA	CARVÃO ATIVADO	CRIOGENIA (CONGELAMENTO)	MEMBRANA	DWA/PSA	LAP	ABSORÇÃO FÍSICA (ABSORVENTES ORGÂNICOS)	ABSORÇÃO QUÍMICA (ABSORVENTES ORGÂNICOS)
Enxofre total [S]						x	x	x	x	x	x	x	[x]	[x]	[x]	[x]	[x]
Sulfeto de hidrogênio [H ₂ S]						x	x	x	x	x	x	x	[x]	[x]	x	x	[x]
Halogênios										x	x			[x]			
Cloro [Cl]						[x]				x	[x]			[x]			
Flúor [F]						[x]				x	[x]			[x]			
Poeira/partículas (<10 µm)			x	x				[x]		[x]	[x]			[x]	x	x	
Total de compostos orgânicos com silício		[x]	[x]								x	x		[x]			
Compostos aromáticos			[x]								x	[x]		[x]			
Umidade absoluta	x	x	x	x	[x]							x	[x]	[x]		x	
Teor de oxigênio [O ₂]													x	x			
Metano [CH ₄]												x	x	x	x	x	x
Número de metano												x	x	x	x	x	x
PCS												x	x	x	x	x	x
PCI												x	x	x	x	x	x
Índice de Wobbe												x	x	x	x	x	x
Dióxido de carbono [CO ₂]									[x]			x	x	x	x	x	x
Nitrogênio [N]														x			
Amônia [NH ₃]	[x]		[x]	[x]							x	x	x		x	x	x
Temperatura do gás	x		x		[x]	[x]						x			[x]		[x]
Pressão operacional					x								x	x	x	x	
Hidrogênio [H ₂]													x				

x = indicado, [x] = indicado com restrições

Fonte: Brasil, 2015

As principais tecnologias em operação comercial segundo Brasil, 2015 para purificação de biogás são:

Lavagem com água pressurizada (LAP): Um processo por adsorção que utiliza água como meio adsorvente. Nesse processo acontece a absorção reversível do CO₂ e de outros componentes ácidos e alcalinos pela água. Para que isso ocorra o

biogás deve ser comprimido em dois momentos, a uma pressão de 7 a 10 bar, e depois inserido na parte inferior de uma coluna. A água é injetada em contracorrente, assim partículas e microrganismos se dissolvem na água, enquanto o metano sai pela parte superior da coluna.

Lavagem com solventes: Nesse processo de absorção física, são utilizados solventes orgânicos como polietileno glicol para absorção de CO_2 , assim como na água, o CO_2 e H_2S são mais solúveis do que o metano, e sendo assim metodologicamente esse funciona igual ao LAP.

Absorção química com aminas: É uma técnica de absorção química em que o biogás despressurizado encontra com uma solução de lavagem que absorve o CO_2 . Para a separação do CO_2 são utilizamos a monoetanolamina (MEA), em baixa pressão para extrair somente o CO_2 ; e a dietanolamina (DEA) em alta pressão sem regeneração. Para a remoção de CO_2 e H_2S , são utilizadas a metildietilamina (MDEA) ou a trietanolamina (TEA) (FNR, 2006). Para recuperar o agente de lavagem, são instaladas fases de retirada de substancias e regeneração a jusante da fase de absorção.

Adsorção com modulação de pressão (PSA): Método a seco que separa os gases conforme suas propriedades físicas, interação entre as moléculas e um material adsorvente. Ocorre a adsorção reversível do CO_2 , também podendo ocorrer a retenção de outros componentes, como exemplos H_2O , H_2S , N_2 e O_2 . Também pode haver o acúmulo de algumas substancias, como hidrocarbonetos e compostos de silício. Na unidade PSA, os materiais adsorventes são colocados em colunas arranjadas sequencialmente de acordo com a qualidade do produto desejado.

Tecnologia de membranas: O processo de separação por membranas faz com que o metano e os demais componentes se separem baseado nas diferentes velocidades de difusão. O CH_4 fica retido pelo tamanho de suas moléculas, enquanto o CO_2 permeia pela membrana. Os processos de separação por membranas se diferem de acordo com a pressão, alta pressão a seco e baixa pressão a úmido.

Tabela 3 – Comparação das principais tecnologias de purificação de biogás.

PARÂMETRO	LAVADOR C/ÁGUA	LAVADOR C/SOLVENTES	ABSORÇÃO QUÍMICA C/AMINAS	PSA	TECNOLOGIA DE MEMBRANAS
Conteúdo típico de metano no biometano gerado [vol%]	95 – 99	95 – 99	> 99	95 – 99	95 – 99
Conteúdo de metano [%]	98	96	99,96	98	80 – 99,5
Perda de metano [%]	2	4	0,04	2	0,5 – 20
Pressão normal do biometano [bar(g)]	4 – 8	4 – 8	Atmosférica	4 – 7	4 – 7
Demanda de energia elétrica [kWh/m³ biometano]	0,46	0,49 – 0,67	0,27	0,46	0,25 – 0,43
Demanda de calor e nível de temperatura p/regeneração de solventes [°C]	Não	Médio 70 – 80	Alto 120 – 160	Não	Não
Remoção prévia de compostos de enxofre	Depende	Sim	Sim	Sim	Sim
Demanda de insumos [produtos químicos]	Agente anti-incrustante, agente de secagem	Solvente orgânico	Solução de amina	Carbono ativado, zeólitos	Não
Faixa de variação parcial de carga permitida [%]	50 – 100	50 – 100	50 – 100	85 – 115	50 – 105
Número de plantas de referência da tecnologia	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo

Fonte: Brasil, 2015

3.3.4 Transporte, manobra, monitoramento e armazenamento do biogás

Dentre as estruturas necessárias para a operação de uma estação de tratamento de esgotos com aproveitamento do biogás, deve-se prever também em projetos as estruturas necessárias para transportar esse gás, para manobrar, para auxiliar no monitoramento do gás produzido e para o armazenamento deste.

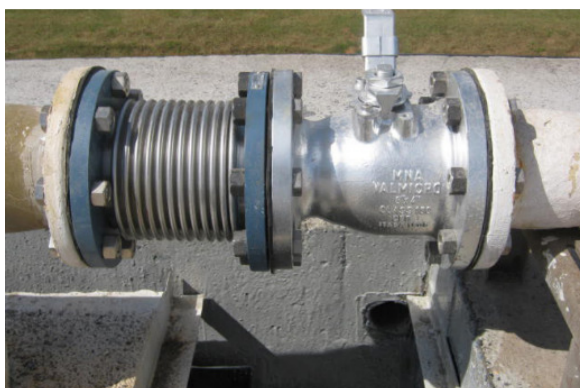
Estruturas para transporte: Os gasodutos ou tubos condutores de biogás devem ser devidamente identificados, sendo esses preferencialmente aéreos, e fabricados em aço inoxidável ou polietileno de alta densidade (PEAD), diâmetro mínimo de 50 mm, pelo que recomenda a norma NBR 12209:2011.

Os gasodutos de modo geral devem seguir as seguintes resistências:

- Mecânicas: Tensões mecânicas, induzidas por deformação; variação térmica; vibrações, etc.
- Térmicas: Proteção contra incêndio, especialmente quando de polietilenos.
- Químicas: Resistência a agentes corrosivos.

As conexões e juntas devem garantir eventuais confinamentos do biogás no interior do gasoduto. A figura abaixo mostra uma junta de expansão e um registro de um gasoduto, esse por sua vez é eventualmente acionado durante as manutenções nos reatores anaeróbios.

Figura 17 – Junta de expansão (esquerda) e registro (direita).

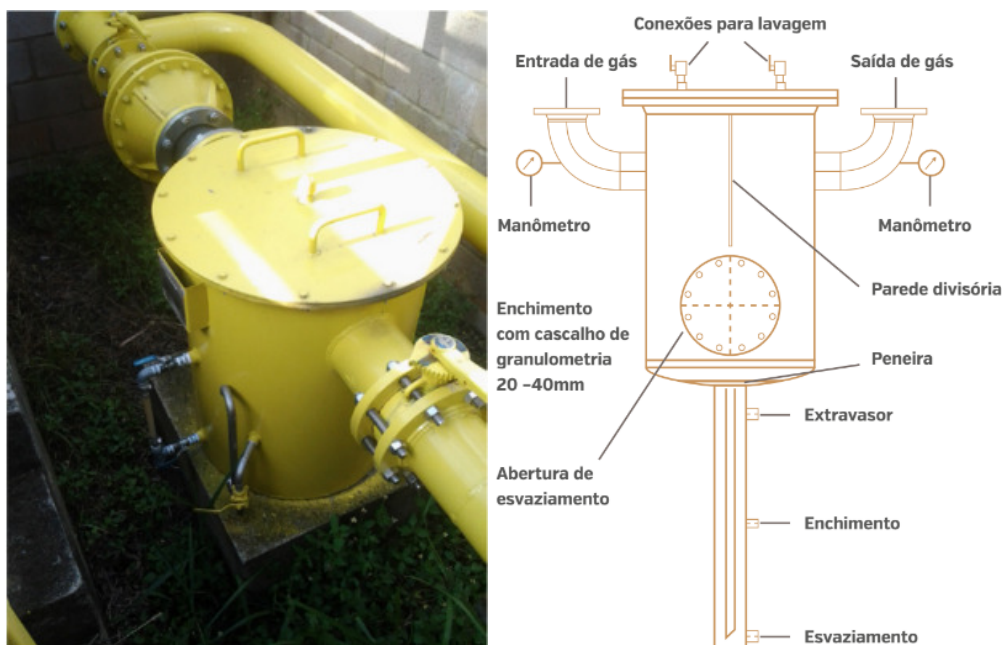


Fonte: Brasil, 2015

Estruturas para manobras: Como visto na figura anterior, em um gasoduto se fazem presentes registros, e, além disso, para manipulação do biogás nos gasodutos temos: tanques para remoção de sedimentos e de condensados, dispositivo de proteção contra sobrepressão e vácuo, válvulas para controle de vazão e válvulas corta-chamas.

Para remoção de partículas grosseiras, faz-se o uso de filtros de cascalho. Em caso de partículas finas, podem ser utilizados filtros cerâmicos (os dois têm operações semelhantes). Devido ao resfriamento passivo do gás ao passar pelo filtro, retira-se, de forma simultânea, a água que condensou no filtro. Ideal que se instale um dreno no ponto inferior do filtro conectado a uma válvula e/ou a um tubo sifonado com nível de coluna de água maior que a pressão dinâmica de condução do biogás. Devem ser instalados manômetros antes e depois dos filtros para controlar as perdas de carga e identificação de entupimentos dos filtros.

Figura 18 – Separador de sedimentos com dreno (esquerda) desenho esquemático de um filtro para remoção de sedimentos e condensados (direita).

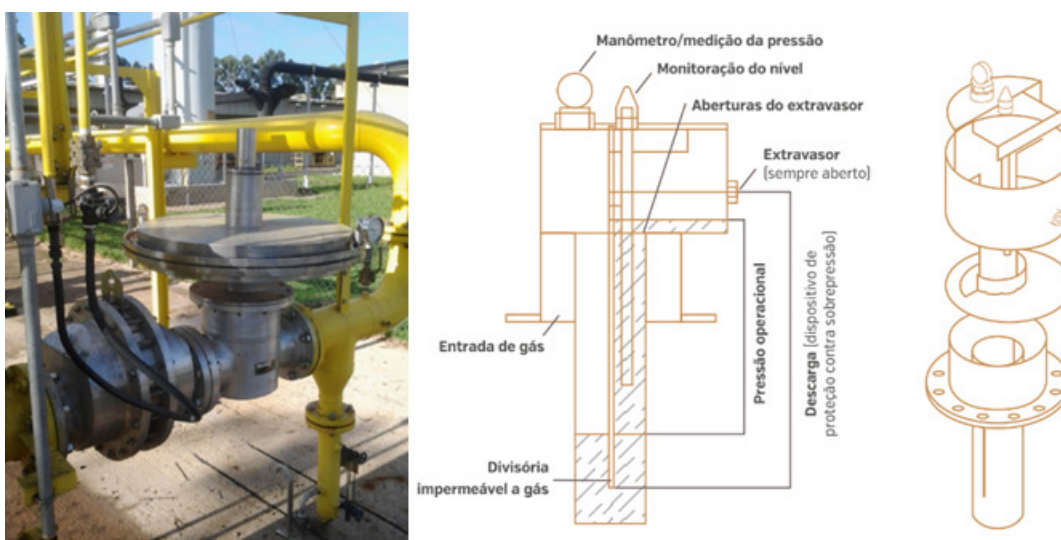


Fonte: Brasil, 2015

Há também dispositivos de proteção contra subpressão (vácuo) e sobrepressão. Esses equipamentos devem garantir que o funcionamento não seja comprometido mesmo que esse seja acionado alguma vez. Sua função além de monitorar a pressão operacional é de funcionar como um dispositivo de indicação de emergências, uma vez que esse dispara em situações de sobrepressão e vácuo, acionando sopradores de gás e/ou de dispositivos autoaspirantes, e válvulas interrompendo o sistema de transporte de gás.

O selo hídrico também pode funcionar como válvula de sobre ou subpressão. A vantagem é uma elevada segurança e um curto tempo de resposta.

Figura 19 – Válvula reguladora de pressão (esquerda) selo hídrico (direita).



Fonte: Brasil, 2015

Dispositivos de controle de vazão, também chamados de registros, devem ser instalados em locais que permitam o isolamento, pelo menos, de reatores anaeróbios, gasômetros e ambientes fechados. É necessário que esses registros possam estar bem localizados e facilmente operados, permitindo isolar diferentes trechos do gasoduto.

Em caso de falhas em trechos a montante de equipamentos consumidores do biogás produzido, ou fontes de potencial ignição deve-se adotar válvulas corta-

chamas, capazes de proteger áreas de formação ou armazenagem de biogás, o que evita por sua vez a propagação e/ou explosões. Classificadas de acordo com a proteção que oferecem, contra deflagração (explosão), detonação ou combustão contínua.

Estruturas para monitoramento: O monitoramento das operações é essencial para a eficiência do todo. O mínimo recomendado é a medição da pressão do biogás no interior das câmaras de gás dos reatores, do gasômetro e nos gasodutos antes e depois dos filtros.

Os elementos ou dispositivos mecânicos para medição de pressão se dividem, basicamente, em dois grupos (Bega et al., 2011):

- Elementos mecânicos de medição direta de pressão: neles, a pressão é medida por meio da comparação com a pressão exercida por uma coluna de líquido com densidade e altura conhecidas. Os manômetros de tubo em “U” e de tubo inclinado servem como exemplos desse tipo de equipamento;
- Elementos mecânicos elásticos de medição de pressão: deformam-se em função da pressão exercida sobre eles pelo fluido sujeito à medição. São exemplos: diafragma, fole, tubo de Bourdon, elemento espiral e elemento helicoidal.

A medição de vazão de biogás é útil para o monitoramento das operações dos reatores anaeróbios, e também para a definição das estratégias de manejo. As diferentes tecnologias podem ser utilizadas para mensurar a vazão e/ou o volume do biogás. As principais e suas vantagens e desvantagens estão correlacionadas na tabela abaixo.

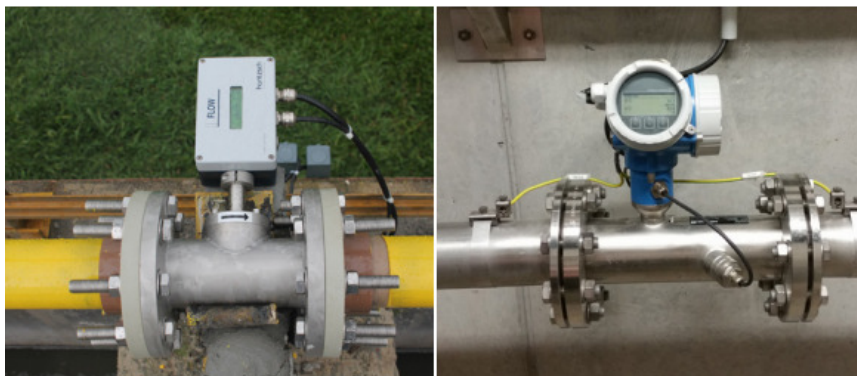
Tabela 4 – Diferentes tecnologias de medição de vazão, vantagens e desvantagens.

TIPO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Medidor ultrassônico	<ul style="list-style-type: none"> » Bons resultados em baixa pressão » Sem partes móveis 	<ul style="list-style-type: none"> » Longa distância linear de medição necessária [15 vezes o diâmetro] » Alto custo
Medidor vórtex	<ul style="list-style-type: none"> » Sem partes móveis » Alta acurácia » Resistente à corrosão » Baixa perda de carga 	<ul style="list-style-type: none"> » Longa distância linear de medição necessária [20 vezes o diâmetro] » Baixa rangeabilidade* » Medições em CNTP necessitam de medições complementares de temperatura e pressão
Medição por meio de pressão dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> » Alta durabilidade » Pouca influência de gases sujos » Variações de pressão não têm influência negativa na acurácia 	<ul style="list-style-type: none"> » Trabalha melhor em alta pressão » Grande esforço de calibração » Erro de 1,5 a 5% » Para o cálculo de Nm^3, a densidade do gás é necessária » Longa distância de medição
Fluidistor	<ul style="list-style-type: none"> » Sem partes móveis » Alta acurácia » Baixo custo » Fácil de limpar, manusear e trocar 	<ul style="list-style-type: none"> » Cálculo complexo de Nm^3 » Erro de 1,5% » Sensível a vibrações no biogás causadas, por exemplo, por compressores pistão
Medidor de turbina	<ul style="list-style-type: none"> » Baixo custo de investimento » Tecnologia de medição simples 	<ul style="list-style-type: none"> » Depósitos causam problemas » Partes móveis podem emperrar » Manutenção intensiva e onerosa » Baixa resolução
Medidor mássico por dispersão térmica	<ul style="list-style-type: none"> » Fácil instalação » Medição direta de Nm^3/massa » Medição precisa até em flutuações de pressão » Baixo custo de investimento » Alta rangeabilidade* » Baixa perda de carga » Recomendado para controle de processo e levantamento de potenciais 	<ul style="list-style-type: none"> » Sensível a umidade e partículas do gás » Longa distância linear de medição necessária [15 vezes o diâmetro] » Calibração necessita de gás padrão » Não recomendado para transferência de custódia

Fonte: Brasil, 2015

As imagens abaixo ilustram dois tipos dessas tecnologias, tipo vórtex e o mássico por dispersão térmica.

Figura 20 – Tipo Vórtex (esquerda) mássico por dispersão térmica (direita).



Fonte: Brasil, 2015

Existe também a possibilidade de monitoramento da composição do biogás, especialmente para se aferir a concentração de metano. Monitoramento essencial, pois a informação produzida contribuir para a eficiência do sistema, havendo quedas bruscas no teor de metano significa que algo está errado na digestão anaeróbia.

Muito importante também é o monitoramento da concentração de oxigênio, uma vez que esse associado ao metano pode ocasionar em uma mistura explosiva. E também serve para indicar se as câmaras de gás ou gasodutos dos digestores foram contaminadas com ar.

Figura 21 – Medidor de composições de biogás.



Fonte: Brasil, 2015

Tabela 5 – Parâmetros a serem monitorados em uma planta de aproveitamento de biogás.

PARÂMETRO	FREQUÊNCIA	COMENTÁRIOS
Vazão do substrato	Continuamente, em tempo real	É de fundamental importância o monitoramento contínuo das vazões afluentes aos reatores UASB e aos digestores de lodo.
Caracterização de novos substratos (pH, TKN, sólidos totais, sólidos voláteis)	Pontual, quando há novo substrato	No caso de reatores UASB, devem ser avaliados aportes extras de substratos, por exemplo, de lodo de tanque séptico, lixiviado de aterro sanitário, dejetos de banheiros químicos, lodo de ETA. Quando o digestor de lodo for receber novos co-substratos, estes devem ser caracterizados, para evitar desestabilização do processo.
Biodegradabilidade anaeróbia de novos substratos (Teste BMP – Potencial Biometanogênico)	Pontual, quando há novo substrato	Quando o reator UASB ou o digestor de lodo for receber novos co-substratos, deve ser verificado o potencial de degradação anaeróbia dos mesmos. Testes BMP são usualmente utilizados para esse propósito.
Vazão de biogás	Continuamente, em tempo real	Pode indicar instabilidade do processo anaeróbio. Subsidiaria decisões com relação a investimentos para plantas de aproveitamento de biogás.
Qualidade do biogás (CH ₄)	Continuamente, em tempo real e quando há aproveitamento de biogás	O conhecimento do teor de CH ₄ é importante quando se planeja ou já existe o aproveitamento de biogás. Mudanças no teor de CH ₄ podem indicar instabilidade do processo.
Qualidade do biogás (H ₂ S, CO ₂ e O ₂)	Continuamente, em tempo real e quando há aproveitamento de biogás	Parâmetros auxiliares para controle de processo. O teor de O ₂ é importante para identificar eventuais formações de misturas explosivas motivadas por contaminação do biogás com ar. Sua medição é importante, sobretudo, para reatores UASB.
Temperatura do biogás	Continuamente, em tempo real	Parâmetro de fácil medição e para controle de processo. Útil para expressar a produção de biogás em CNTP.
Pressão do biogás	Continuamente, em tempo real	Parâmetro de fácil medição e para controle de processo. Útil para expressar a produção de biogás em CNTP.
Temperatura no reator anaeróbio	Continuamente, em tempo real	A temperatura deve ser medida, obrigatoriamente, no caso de digestores de lodo que trabalham no regime mesofílico e apresentam sistema de aquecimento e/ou revestimento térmico. Recomenda-se, também, a medição da temperatura em reatores UASB e no caso de digestores de lodo em condições psicrófilas.
DQO do substrato	2 a 4 vezes por semana	Útil para a avaliação da eficiência de degradação da matéria orgânica
Sólidos totais e voláteis do substrato	2 a 4 vezes por semana	Útil para a avaliação da eficiência de degradação da matéria orgânica. Nos digestores de lodo, a determinação é necessária para controle de bombeamento e mistura.
pH do substrato	2 a 4 vezes por semana	Recomenda-se no caso de digestores de lodo e de reatores UASB.

Fonte: Brasil, 2015

Estruturas para armazenamento: Para o aproveitamento energético do biogás, é indispensável que esse seja armazenado em gasômetros. Esses por sua vez podem trabalhar de forma associada, em série ou paralelo. Em paralelo tem a desvantagem de que o biogás armazenado pode ter propriedades diferentes, o que interfere nos equipamentos consumidores, causando falhas. Em série deve se ter uma tubulação que funcione como by-pass para situações de reparos.

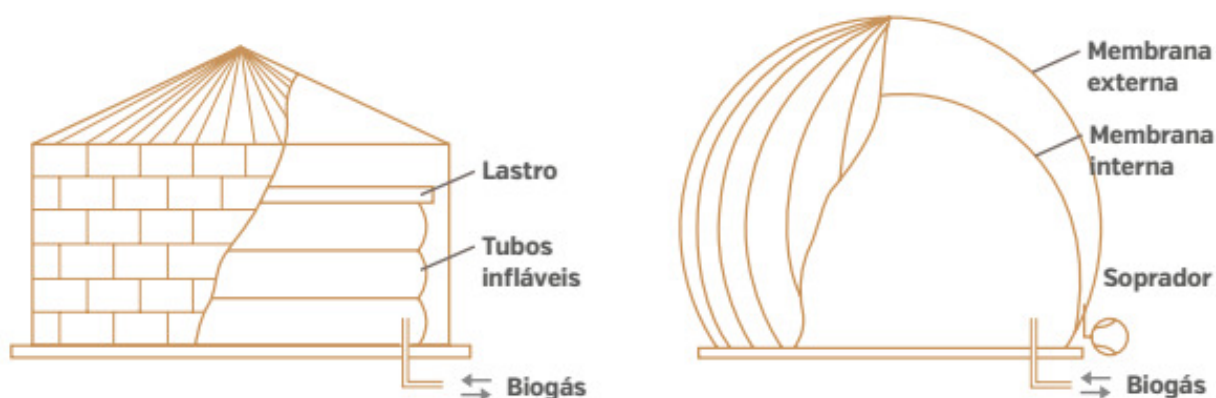
Abaixo desenho esquemático dos principais gasômetros:

Figura 22 – Membranas com lastro (esquerda) Balão de lona (direita).



Fonte: Brasil, 2015

Figura 23 – Tubos infláveis (esquerda) membrã dupla com ar comprimido (direita).



Fonte: Brasil, 2015

Figura 24 – Membrana dupla Arrudas/BH (esquerda) Tubos infláveis Alemanha (direita).



Fonte: Brasil, 2015

3.3.5 Unidades motor gerador

Os conjuntos motogeradores a gás, ao mesmo tempo em que geram energia elétrica são capazes de gerar energia térmica, por isso também são conhecidos como unidades de cogeração. Os dois tipos mais comuns são o de ciclo Otto e ciclo Diesel.

Motogeradores a gás de ciclo Otto, quase que exclusivamente de quatro tempos, servem para pequenas, médias e grandes plantas de cogeração. Em caso de motores aspirados são alimentados com uma mistura de biogás e ar, já em motores com turbocompressor, a mistura gás e ar é comprimida antes de entrar no cilindro. Uma quantidade maior de combustível no cilindro aumenta o desempenho do motor.

Já os motogeradores a gás de ciclo Diesel têm predominância em plantas de cogeração de grande porte. Diferentemente dos motogeradores de ciclo Otto, esse realiza ignição interna, misturando biogás, ar e uma pequena quantidade de óleo diesel. Sua eficiência mecânica é superior à dos motogeradores de ciclo Otto, e esse possibilita um funcionamento unicamente com diesel.

Abaixo uma tabela de comparação entre os dois tipos de motogeradores.

Tabela 6 – Comparação entre motogeradores a gás, ciclo Otto e Diesel.

	MOTOR A GÁS DE CICLO OTTO	MOTOR A GÁS DE CICLO DIESEL
Valores característicos	<ul style="list-style-type: none"> » potência elétrica >1 MW, raramente abaixo de 50 kW » eficiência elétrica 34% a 42% [para potências nominais >300 kW] » vida útil: aproximadamente 60.000 horas de operação » pode ser utilizado com teores de metano a partir de, aproximadamente, 45% 	<ul style="list-style-type: none"> » 2 a 5% de óleo de ignição para combustão » potência elétrica de, aproximadamente, 340 kW » vida útil: aproximadamente 35.000 horas de operação » eficiências elétricas 30 a 44% [eficiência em torno de 30%, somente em plantas pequenas]
Aplicação	» em qualquer planta de biogás; aplicação comercial mais provável em plantas de maior porte	» em qualquer planta de biogás; aplicação comercial somente em plantas de menor porte
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> » construído especialmente para o uso com gás » os limites de emissões são respeitados ao máximo [possibilidade de exceder os limites de formaldeído] » exige pouca manutenção » eficiência total superior à de motores com ignição a compressão 	<ul style="list-style-type: none"> » uso de motores comuns a baixo custo » eficiência elétrica maior em comparação aos motores a gás do ciclo Otto em faixas inferiores de potência
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> » investimento ligeiramente superior ao do motor com ignição a compressão » maiores custos devidos à fabricação em escala reduzida » eficiência elétrica menor que a de motores com ignição à compressão em faixas inferiores de potência 	<ul style="list-style-type: none"> » a carbonização dos bicos injetores ocasiona a elevação das emissões de gases de exaustão (NOx) e manutenção mais frequente » não existem motores desenvolvidos especificamente para o biogás » eficiência total menor que a de motores a gás do ciclo Otto » exige o uso de um combustível adicional [óleo de ignição] » a emissão de poluentes frequentemente excede os valores-limite da TA Luft » vida útil curta
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> » exige um radiador de emergência para evitar superaquecimento em situações de pouca demanda de calor » o controle de potência depende da qualidade do gás, sendo possível e recomendável 	<ul style="list-style-type: none"> » exige um radiador de emergência para evitar superaquecimento em situações de pouca demanda de calor » o controle de potência em depende da qualidade do gás, sendo possível e recomendável
Formas construtivas	» como equipamento separado e independente instalado em edifício ou em construção compacta em contêiner	» como equipamento separado e independente instalado em edifício ou em construção compacta em contêiner

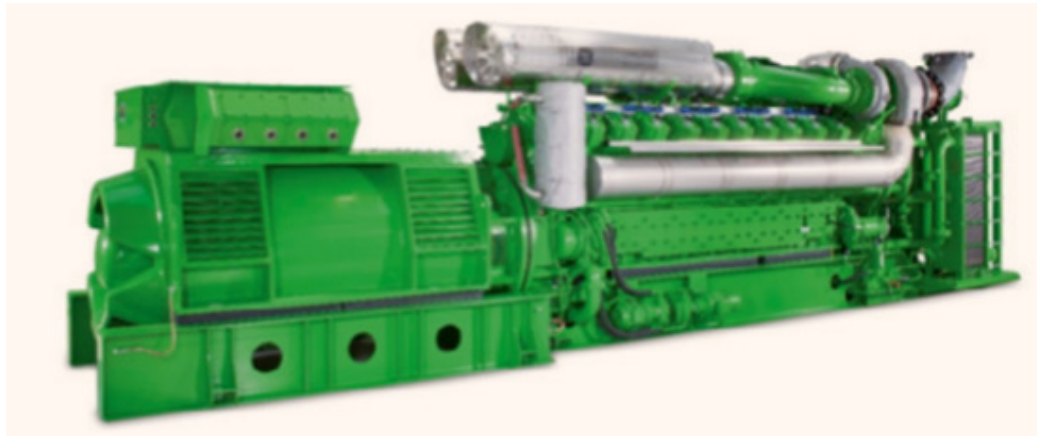
Fonte: Brasil, 2015.

Figura 25 – Instalação completa com contêineres (esquerda) motor a gás da Dreyer & Bosse Krafwerke GmbH (direita).



Fonte: BRASIL, 2015

Figura 26 – Motor a gás da GE Distributed Power.



Fonte: BRASIL, 2015

4 METODOLOGIA DO PROBIOGÁS

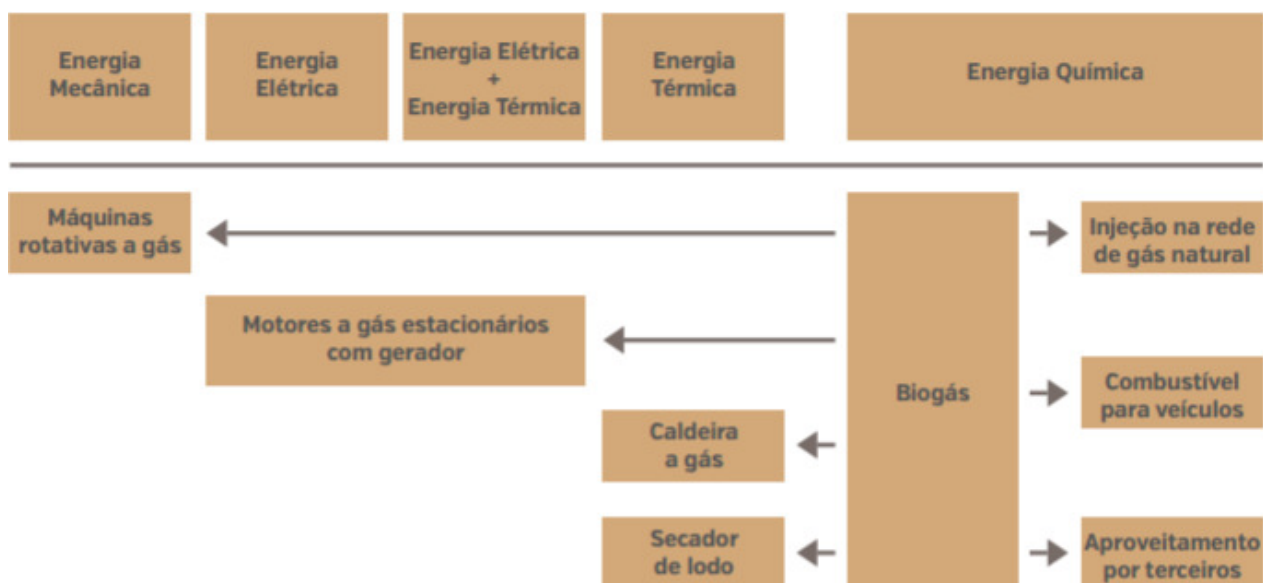
O PROBIOGÁS teve como uma das finalidades demonstrar a viabilidade econômica e sustentabilidade de dois arranjos de estação de tratamento de esgotos, um arranjo com reatores UASB e o outro com digestores de lodo.

A seguir serão apresentadas as premissas adotadas, tipo de energia a ser gerada, a definição das plantas (arranjos) da ETE, discriminação da região a qual esse estudo se aplicaria a população, levantamento dos equipamentos utilizados e despesas com operação e manutenção.

4.1 Identificação da energia gerada

Como o foco é a geração de energia elétrica utilizando o biogás de ETE, se faz necessário o uso de motogeradores de combustão interna tipo Otto ou Diesel, ou microturbinas. Correlação ilustrada na figura abaixo.

Figura 27 – Correlação entre o tipo de energia e a fonte geradora.

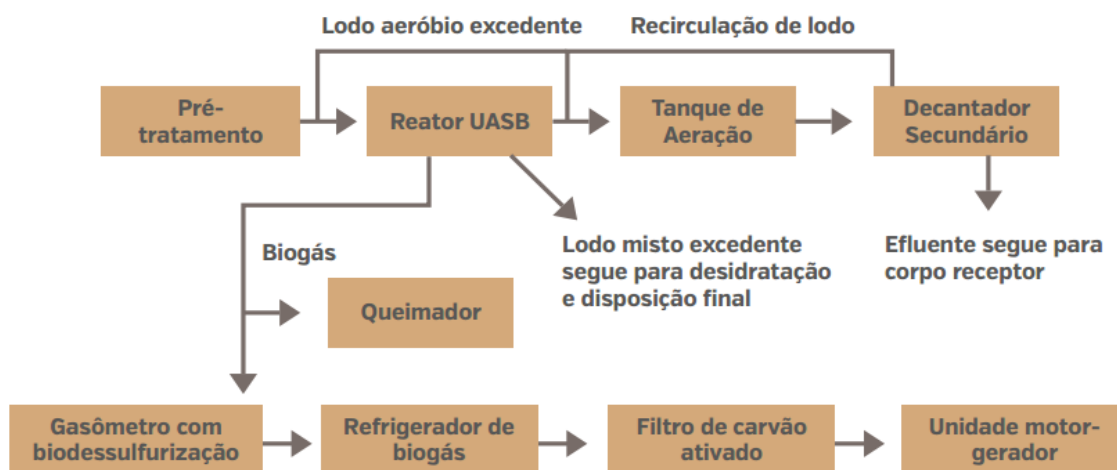


Fonte: Brasil, 2015

4.2 Plantas com aproveitamento energético de biogás

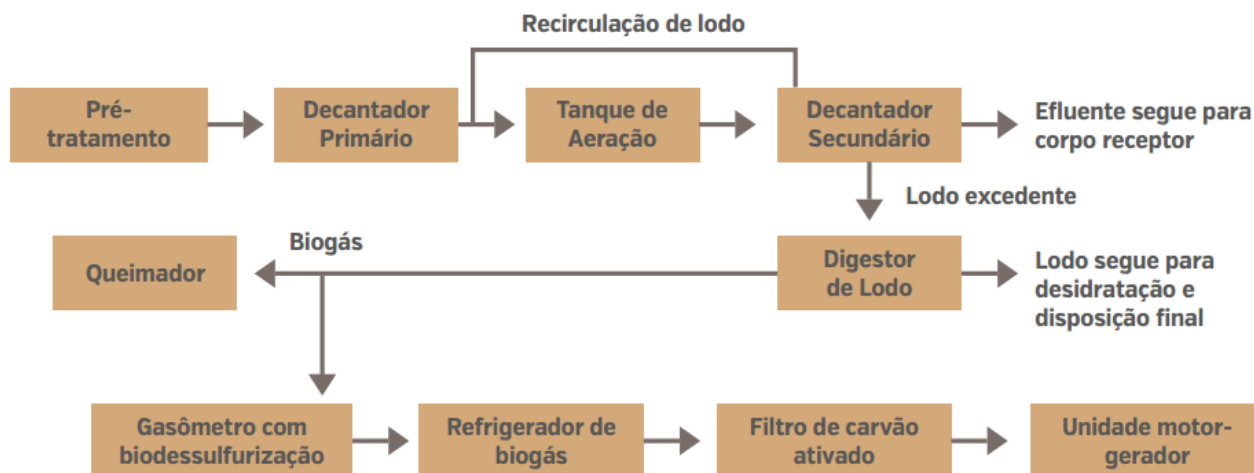
Como já definido anteriormente o biogás que alimentará todo o sistema será gerado com reatores UASB e digestores de lodo. Como são processos diferentes será necessário à definição de dois arranjos diferentes, que serão mostrados nas figuras a seguir.

Figura 28 – Arranjo com reator UASB.



Fonte: Brasil, 2015

Figura 29 – Arranjo com digestor de lodo.



Fonte: Brasil, 2015

4.3 Discriminação da região e população do atendimento da ETE

Foi adotada para o estudo uma população base de 100.000 habitantes. Em uma amostra de 1.439 ETEs brasileiras, apenas 142 atendem mais que 100 mil habitantes segundo levantamentos feitos por Chernicharo (2015). Quanto à região, alguns valores irão variar, como o custo com materiais para construção, equipamentos, fretes, etc. Apesar disso, os custos sugeridos neste trabalho servirão como uma estimativa genérica para todo o território brasileiro.

Após definida a população, segue uma tabela que caracteriza de forma geral as premissas do estudo que será feito.

Tabela 7 – Premissas do estudo.

CRITÉRIO	PREMISSA
População	<ul style="list-style-type: none"> 100.000 habitantes
Forma de aproveitamento	<ul style="list-style-type: none"> Unidade motor-gerador ciclo Otto para geração de energia elétrica Geração elétrica contínua [24 horas por dia]
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> Concepção tecnológica de ETE nova Ampliação de um sistema de aproveitamento de bio-gás em ETEs existentes [com ressalvas]
Tarifa de energia elétrica*	<ul style="list-style-type: none"> Horosazonal – verde A4 para a faixa de tensão de 2,3 a 25 kV da COELBA com desconto de 15% [detalhes nas seções 6.1.1 e 8.3.2]
Câmbio base**	<ul style="list-style-type: none"> R\$ 3,50 por Euro
Juros de empréstimo*	<ul style="list-style-type: none"> 8,70% [BNDES]
Taxa de inflação*	<ul style="list-style-type: none"> 6,50%
Destino final de lodo	<ul style="list-style-type: none"> Custos de disposição final em aterro sanitário sem higienização
* Base 07/2015	
** Variado na análise de sensibilidade	

Fonte: Brasil, 2015

4.4 Levantamento das obras de implantação da ETE

Parte dos custos que posteriormente serão analisados na apresentação dos resultados vêm das obras civis de implantação da estação de tratamento de esgoto. Esses custos vão englobar os materiais e a mão de obra para a construção de todas as unidades de tratamento, exceto o digestor de lodo, pois se trata de um tanque de aço vitrificado suportado por uma base feita de concreto armado.

Outra observação a ser feita é que nesse estudo as unidades auxiliares do tipo, casa de operação, edifício de administração, estação elevatória de lodo, esgotamento pluvial, são as mesmas para ambos os arranjos de geração de energia elétrica com biogás.

Tabela 8 – Custos unitários de obras civis.

ITEM	DESCRIÇÃO	UN.	CUSTO UNITÁRIO		SINAPI
			SEM BDI	COM BDI	
Concreto	Concreto usinado bombeado fck = 30 MPA, inclusive lançamento e adensamento	m³	R\$ 375,37	R\$ 466,13	74138/004
Armadura (aço)	Aço CA-60, considerando fornecimento, corte [c/ perda de 10%], dobra e colocação	kg	R\$ 6,97	R\$ 8,66	73942/001
Formas	Forma para estruturas de concreto (pilar, viga e laje) em chapa de madeira compensada resinada, de 1,10 x 2,20, espessura = 12 mm, 02 utilizações. [fabricação, montagem e desmontagem]	m²	R\$ 44,56	R\$ 55,33	84214
Cimbramento	Execução de cimbramento para escoramento de formas elevadas de madeira (lajes e vigas), acima de 3,30 m de pé direito, com pontaletes (8x8 cm) de madeira de lei 1ª qualidade e peças de madeira de 2,5x10 cm de 2ª qualidade, não aparelhada	m³	R\$ 29,90	R\$ 37,13	73685
Impermeabilização	Impermeabilização de superfície, com impermeabilizante flexível a base acrílica.	m²	R\$ 62,87	R\$ 78,07	73872/002

Fonte: Brasil, 2015

Tabela 9 – Quantitativos dos serviços de obras civis.

DESCRIÇÃO	UN.	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Concreto	m ³	1.780	1.780	2.225	2.225
Aço CA-60	kg	213.580	213.580	267.031	267.031
Forma para estruturas de concreto (pilar, viga e laje) em chapa de madeira compensada resinada, 2 x	m ²	1.780	1.780	2.225	2.225
Cimbramento	m ³	0	0	6.667	6.667
Impermeabilização de superfície, com impermeabilizante flexível a base acrílica	m ²	5.800	5.800	3.766	3.766

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

Tabela 10 – Custos CAPEX – Obras civis.

DESCRIÇÃO	CUSTOS EM R\$			
OBRAS CIVIS	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Concreto	829.643,58	829.643,58	1.037.270,42	1.037.270,42
Aço CA-60	1.848.613,08	1.848.613,08	2.311.247,51	2.311.247,51
Forma para estruturas de concreto (pilar, viga e laje) em chapa de madeira compensada resinada, 2 x	98.486,61	98.486,61	123.133,89	123.133,89
Cimbramento	0,00	0,00	247.532,13	247.532,13
Impermeabilização de superfície, com impermeabilizante flexível a base acrílica	452.851,05	452.851,05	294.014,36	294.014,36
SUBTOTAL	3.229.594,32	3.229.594,32	4.013.198,32	4.013.198,32

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

Para alcançar os valores totais com as obras de implantação, foram realizadas relações empíricas, baseadas nos custos de obras semelhantes ao que é proposto nessa simulação (RKS, 2015).

4.5 Levantamento de equipamentos

Para que posteriormente seja feito o levantamento dos custos unitários, primeiro será feita a descrição dos equipamentos, quantidades e fabricantes. Assim teremos uma base para efeito de cálculos. Segue abaixo tabela descritiva.

Tabela 11 – Quantidades e custos unitários de equipamentos.

EQUIPAMENTOS		QUANTIDADE				CUSTO UNITÁRIO SEM BDI EM R\$	CUSTO UNITÁRIO COM BDI EM R\$	REFERÊNCIA
		DP-LA-C-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS			
Removedor de lodo	Decantador primário	2	2			165.565,00	188.777,21	SIGMA
	Decantador secundário – 18,50 m			2	2	236.947,00	270.166,97	SIGMA
	Decantador secundário – 21,50 m	2	2			257.555,00	293.664,21	SIGMA
	Adensador	2	2			184.379,20	210.229,17	SIGMA
LA	Aerador mecânico – 60 cv	6	6	4	4	123.785,80	141.140,57	Ecosan
UASB	Sistema de Remoção de Escuma			1	1	-	129.349,74	Rotária do Brasil
	Sistema de Separação Trifásica			1	1	-	738.000,00	Rotária do Brasil

Biodigestor	Tanque de aço ***	2	2		951.878,95	1.085.332,38	FARMATIC	
	Misturador ***	2	2		273.566,16	311.920,14	FARMATIC	
	Calefação ***	2	2		106.759,80	121.727,52	FARMATIC	
	Isolamento	2	2		17.205,01	19.617,15	Rotária do Brasil	
Geral	Instalações elétricas gerais LAC	1	1		-	998.000,00	Rotária do Brasil	
	Instalações elétricas gerais IIASB			1	1	-	667.090,31	Rotária do Brasil
Sistema de aproveitamento de Biogás	Unidade Motor-Gerador – 176 kW ***		1		1	1.065.221,50	1.214.565,55	Dreyer & Bosse
	Unidade Motor-Gerador –151 kW ***				** [1]	970.181,82	1.106.201,31	Dreyer & Bosse
	Sistema de Tratamento de Biogás ***		1		1	145.078,59	165.418,60	Dreyer & Bosse
	Sistema de Tratamento de Biogás ***				** [1]	138.349,39	157.745,97	Dreyer & Bosse
	Gasômetro – 400 m³ ***		1		1	279.349,19	318.513,95	BAUR
	Sistema de captação de biogás			1	1	120.964,00	137.923,15	Rotária do Brasil

Sistema de transporte de biogás	1	1	59.876,00	68.270,62	Rotária do Brasil
Instalações Elétricas *	1	1	117.570,84	134.054,27	Rotária do Brasil
Medição de vazão de biogás ***	1	1	29.988,00	34.192,32	Höntzsch
Medição de composição de biogás ***	1	1	86.357,38	98.464,68	Union Instruments
Sistema de queima	1	1	80.568,17	91.863,83	Rotária do Brasil
* Instalações elétricas específicas para motor-gerador					
** Para análise de sensibilidade com perda de biogás no reator UASB					
*** Considerado importado					

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

Tabela 12 – Custos CAPEX - Equipamentos.

DESCRIÇÃO		CUSTOS EM R\$			
EQUIPAMENTOS		DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Removedor de lodo	Decantador primário	377.554,43	377.554,43		
	Decantador secundário - 18,50 m			540.333,94	540.333,94
	Decantador secundário - 21,50 m	587.328,42	587.328,42		
	Adensador	420.458,34	420.458,34		
Lodo ativado	Aerador mecânico - 60 cv	846.843,41	846.843,41	564.562,28	564.562,28
UASB	Sistema de Remoção de Escuma			129.349,74	129.349,74
	Sistema de Separação Trifásico			738.000,00	738.000,00

Biodigestor	Tanque de aço	2.170.664,75	2.170.664,75		
	Misturador	623.840,27	623.840,27		
	Calefação	243.455,05	243.455,05		
	Isolamento	39.234,30	39.234,30		
Geral	Instalações elétricas gerais	998.000,00	998.000,00	667.090,31	667.090,31
Sistema de aproveitamento de Biogás	Unidade Motor- Gerador – 176 kW		1.214.565,55		1.214.565,55
	Sistema de Tratamento de Biogás		165.418,60		165.418,60
	Gasômetro – 400 m³		318.513,95		318.513,95
	Sistema de captação de biogás			137.923,15	137.923,15
	Sistema de transporte de biogás		68.270,62		68.270,62
	Instalações Elétricas*		134.054,27		134.054,27
	Medição de vazão de biogás		34.192,32		34.192,32
	Medição de composição de biogás		98.464,68		98.464,68
	Sistema de queima	91.863,83	91.863,83	91.863,83	91.863,83
	Subtotal	6.399.242,80	8.432.722,79	2.869.123,25	4.902.603,24

* Instalações elétricas específicas para motor-gerador

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

Para os casos onde os equipamentos são de fornecedores estrangeiros, foram feitas as devidas correções, levando em conta o acréscimo das taxas e impostos inerentes à importação destes.

4.6 Levantamento das despesas com operação e manutenção

São levados em conta também todos os insumos gastos em operação e manutenção. A tabela 13 levanta os quantitativos e os itens e a tabela 14 mostra os totais de cada insumo, levado em conta para o tempo de um ano de operação.

Tabela 13 – Quantitativo dos itens considerados para determinação de OPEX e custos unitários.

		UNITÁRIO		DL-GAS	LAC	
Consumo Energético por ano	kWh/a	0,337609	2.139.982	2.139.982	1.430.422	1.430.422
Disposição do lodo	m³/a	150,00	5.556	5.556	4.260	4.260
Manutenção de geração	kW/a	0,0210		1.409.916		1.409.506
Reparação de geração	kW/a	0,0315		1.409.916		1.409.506
Manutenção do sistema de tratamento de gás	m³/a	0,0350		625.044		743.884
Manutenção do Gasômetro	un	6.370,28		1		1
Manutenção do Sistema de captação de biogás	un	2.758,46	1	1	1	1
Manutenção do Sistema de transporte de biogás	un	1.365,41		1		1
Manutenção das Instalações Elétricas	un	2.681,09		1		1
Manutenção do Sistema de captação de biogás	un	2.758,46	1	1	1	1
Manutenção do Sistema de transporte de biogás	un	1.365,41		1		1

Manutenção das Instalações Elétricas	un	2.681,09		1		1
Manutenção da Medição de vazão de biogás	un	683,85		1		1
Manutenção da Medição de composição de biogás	un	1.969,29		1		1
Manutenção do Sistema de queima	un	1.837,28	1	1	1	1
Autoconsumo de energia elétrica do CHP	kWh/a	0,192188		28.198		28.190
Consumo de Óleo Lubrificante	l/a	7,28		1.007		1.007
Análises Laboratoriais –Óleo Lubrificante	un	435,00		12		12
Análises Laboratoriais –Biogás	un	1.800,00		2		2
Mão de Obra de Operador	h/a	25,43		724		724
Custos Gerais	kW	24,50		176		176

Fonte: Adaptado do Brasil. 2015

Tabela 14 – Custos OPEX anuais.

DESCRIÇÃO	CUSTOS ANUAIS EM R\$			
	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
Consumo energético por ano	722.477,85	722.477,85	482.923,82	482.923,82
Disposição do lodo	833.391,36	833.391,36	639.028,64	639.028,64
Manutenção de geração		29.608,23		29.599,63
Reparação de geração		44.412,34		44.399,45

Manutenção do sistema de tratamento de gás		21.876,52		26.035,92
Manutenção do gasômetro		6.370,28		6.370,28
Manutenção do sistema de captação de biogás			2.758,46	2.758,46
Manutenção do sistema de transporte de biogás		1.365,41		1.365,41
Manutenção das instalações elétricas		2.681,09		2.681,09
Manutenção da medição de vazão de biogás		683,85		683,85
Manutenção da medição de composição de biogás		1.969,29		1.969,29
Manutenção do sistema de queima	1.837,28	1.837,28	1.837,28	1.837,28
Autoconsumo de energia elétrica do CHP		9.520,01		9.517,25
Consumo de óleo lubrificante		7.331,56		7.329,43
Análises laboratoriais - óleo lubrificante		5.220,00		5.220,00
Análises laboratoriais - biogás		3.600,00		3.600,00
Mão de obra do operador		18.420,99		18.415,65
Custos gerais		4.317,87		4.316,61

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

4.7 Levantamento da receita com a geração de energia elétrica

Para determinar a receita gerada através da venda da energia elétrica, produto do sistema de aproveitamento energético do biogás, primeiro foi feito o levantamento do quanto de biogás é gerado em cada arranjo.

Conforme Brasil, (2015), o biogás produto do arranjo com digestor de lodo, tem teor de metano entre 60 à 70% e um PCI (poder calorífico inferior) entre 6,0 e 7,0 kWh/Nm³. Para efeito de calculo foram atribuídos os seguintes valores médios: 65% de teor de metano e 6,5 kWh/Nm³ de PCI.

Já no arranjo com o reator UASB, segundo Cabral et al. (2015), os reatores UASB geram biogás com teor de metano mais elevados que os dos digestores de lodo, variando entre 60 e 85% e um PCI de 7,8 kWh/Nm³.

Os cálculos para obtenção da vazão do biogás disponível serão demonstrados nos anexos (ANEXO I), sendo consideradas as recomendações técnicas descritas em Chernicharo (2007). Foi descontada uma perda de 30% em reatores UASB.

Quanto a tarifa de energia elétrica, foi adotada uma tarifa média ponderada baseada em valores praticados por diversas concessionárias (tabela 9).

Equação para obtenção do valor da tarifa média ponderada (Brasil, 2015):

$$T = \frac{7980.h.T_{fp} + 780.h.T_p}{8760.h}$$

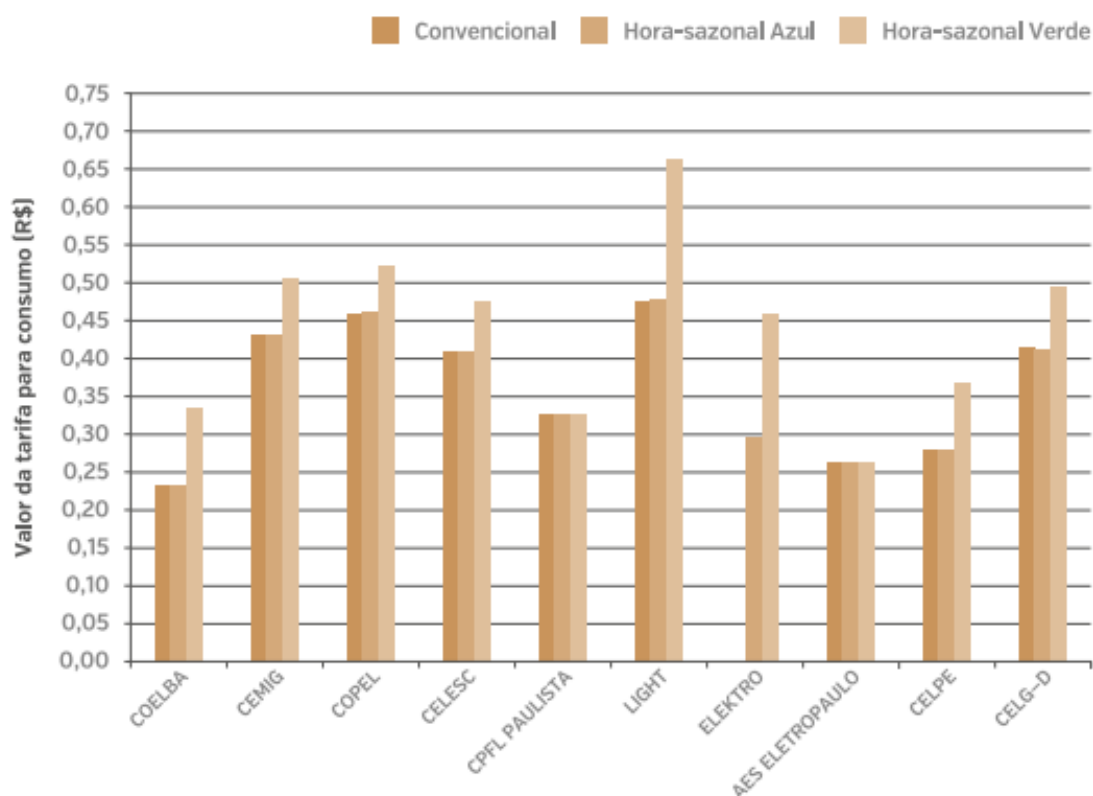
Onde,

T = Tarifa média ponderada

T_{fp} = Tarifa fora da ponta em R\$

T_p = Tarifa da ponta em R\$

Figura 30 – Gráfico, tarifas médias de energia elétrica no ano de 2015.



Fonte: Brasil, 2015

Foi levado em conta que ao longo de um ano, as unidades motor-geradores Otto funcionarão 8000 horas, que representam aproximadamente 91% das 8760 horas de um ano. Essa margem se deve a prováveis pausas técnicas.

5 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos explicitados, foram feitos levantamentos bibliográficos, utilizando principalmente publicações do PROBIOGÁS, disponibilizadas pelo Ministério das Cidades.

Em publicações voltadas para a viabilidade técnica-econômica desse sistema de aproveitamento energético do biogás de ETE, os resultados obtidos foram positivos, ou seja, o sistema se provou viável. Esse trabalho se utilizará de alguns dados e parâmetros dessas publicações, apesar disso a apresentação dos resultados obtidos será diferente, devido a algumas adequações promovidas para apresentar um cenário diferente.

Os cálculos para estipular os valores das receitas geradas com o aproveitamento do biogás foram feitos da mesma maneira, utilizando a mesma fórmula, mas os valores foram diferentes, pouca diferença, o que deve ter sido causado por questões de arredondamento.

As planilhas de fluxo de caixa também elaboradas de maneira diferente, na coluna referente aos custos com CAPEX foram utilizados os mesmos valores, pois estes tem base em experiências de manutenções periódicas em ETEs da Alemanha, país onde já foram registradas mais experiências com o aproveitamento energético do biogás de ETE.

A fim de criar um cenário mais voltado para uma simples análise de viabilidade técnico-econômica, foram desconsideradas as questões que envolvem os cálculos de valor presente líquido e taxa interna de retorno.

Nas colunas referentes a OPEX, os custos com energia foram subtraídos do valor total com OPEX. As tarifas de energia de uma ETE sofrem desconto de 15%, ou seja, uma distinção desse valor e a dedução desse desconto deixa o cenário mais fiel a realidade.

As tarifas de energia praticadas na operação e na receita sofreram reajuste de 2% ao ano. O PROBIOGÁS simulou com dois valores de reajuste, 0,5% e 2%, para obter uma margem mais segura o aumento adotado foi o mais próximo da realidade atual.

A inflação anual foi resultado de uma média histórica das taxas de inflação praticadas no Brasil nos últimos anos.

Para fazer a estimativa do Payback foi necessário isolar os gastos e a receita gerada somente com o sistema de aproveitamento do biogás, ou seja, foi feita a subtração dos custos com CAPEX e OPEX do sistema com aproveitamento do sistema sem aproveitamento, resultando em um fluxo de caixa independente, onde os valores da receita vão se contrapor aos valores dos gastos, e representados na coluna “acumulado”.

Assim que essa coluna mostrar valores positivos significará que as adequações para o aproveitamento energético do biogás foram pagas pela receita do próprio sistema, e se esse valor de saldo acumulado continuar positivo a partir daí, significará que o sistema se sustentará financeiramente.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Custos totais obras civis e equipamentos - CAPEX

Como pode ser verificado na tabela abaixo, o custo com obras no arranjo com o digestor de lodo ficou mais baixo devido ao fato de que o digestor de lodo entra como equipamento, diferente do reator UASB. Também por conta disso o custo com equipamentos do arranjo com digestor de lodo ficou mais elevado por ter esse equipamento a mais do que no arranjo com reator UASB.

Tabela 15 – CAPEX em R\$.

DESCRIÇÃO	ALTERNATIVAS			
	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
	Custos CAPEX em R\$			
Obras Civis	3.229.594	3.229.594	4.013.198	4.013.198
Equipamentos	6.399.243	8.432.723	2.869.123	4.902.603
Total	9.628.837	11.662.317	6.882.322	8.915.802
DP-LAC-DL	Decantação primária + lodo ativado convencional + digestor de lodo			
DP-LAC-DL-GAS	Decantação primária + lodo ativado convencional + digestor de lodo + sistema de aproveitamento de biogás			
UASB-LAC	Reator UASB + lodo ativado convencional			
UASB-LAC-GAS	Reator UASB + lodo ativado convencional + sistema de aproveitamento de biogás			
Observação	Os custos referentes às obras civis da implementação do sistema de aproveitamento de biogás foram contabilizados na categoria "Equipamentos"			

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

Para efeito de comparação, temos os arranjos com e sem aproveitamento energético do biogás, o que fica claro é que os valores totais de cada segmento muda em função dos equipamentos, pois com o aproveitamento energético são

utilizados mais equipamentos do tipo, queimadores, gasômetros, motogeradores, gasodutos etc.

6.2 Custos totais com operação e manutenção - OPEX

A fim de facilitar a comparação entre as despesas com operação e manutenção, os resultados foram expostos nas tabelas e gráficos a seguir. A ressalva a ser feita é que infelizmente no Brasil ainda não tivemos amostras suficientes de experiências com aproveitamento do biogás em ETEs, portanto foram utilizadas experiências alemãs e adequadas aos preços praticados no Brasil.

A tabela 16 e a figura 30 logo abaixo, mostram e comparam os resultados anuais dos custos com operação e manutenção dos 4 arranjos.

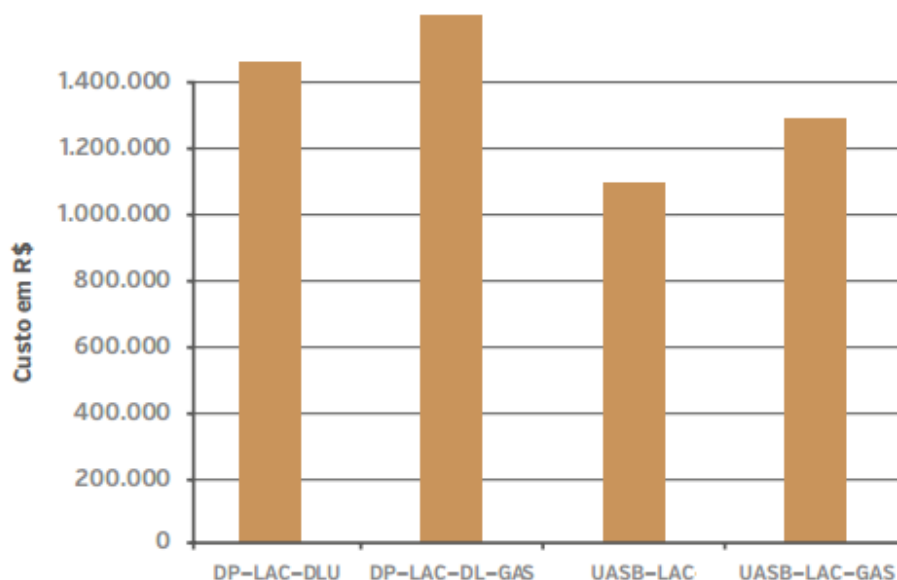
Tabela 16 – OPEX em R\$.

DESCRIÇÃO	ALTERNATIVAS			
	DP-LAC-DL	DP-LAC-DL-GAS	UASB-LAC	UASB-LAC-GAS
OPEX em R\$/a	1.560.464,95	1.713.741,76	1.126.548,19	1.283.952,63

Fonte: Adaptado do Brasil, 2015

Aqui também fica claro que os arranjos com aproveitamento energético têm seus custos mais elevados quando comparados com os mesmos arranjos sem aproveitamento. Sistemas com aproveitamento têm mais equipamentos a serem operados, ou seja, isso vai demandar mais manutenção e reparos destes, entre outros gastos com o tratamento e inspeção do biogás, por isso o valor total é superior.

Figura 31 – Gráfico comparativo entre os custos com OPEX.



Fonte: Brasil, 2015

6.3 Receitas com a geração de energia

Os arranjos com aproveitamento energético do biogás, tem por consequencia desse aproveitamento a produção de energia elétrica que pode ser considerada como custo evitado, devido à relação de abatimento de créditos com a concessionária de energia elétrica da região e assim gerando um valor considerado como receita.

Considerando uma geração contínua de energia elétrica, a receita anual gerada demonstrada na tabela a seguir foi de R\$ 475.876,02 para o arranjo com digestor de lodo, e R\$ 475.987,21 para o arranjo com reator UASB.

Tabela 17 – Demonstração dos valores de receita.

ARRANJO	Q _{bd}		PCI	$\eta_{\text{elétrico}}$	Pelétrica	Tempo anual		PGelétrica
	m ³ /d	m ³ /h				h	%	
DP-LAC-DL-GAS	1.712	71,33	6,5	38	176,19	8000	91	1.409.546,67
UASB-LAC-GAS	1.427	59,46	7,8	38	176,23	8000	91	1.409.876,00

Q_{bd} = Vazão de biogás disponível em m³/d, conforme ANEXO I

PCI = Poder calorífico inferior em kWh/Nm³ biogás

$\eta_{\text{elétrico}}$ = Rendimento elétrico do motogerador

Pelétrica = Potência elétrica

Tempo anual = Disponibilidade técnica do motogerador

PGelétrica = Potencial de geração de energia elétrica

$$PGelétrica = \text{Tempo anual (h)} \times Pelétrica$$

$$Pelétrica = Q_{bd} \text{ (m}^3\text{/h)} \times PCI \times \eta_{\text{elétrico}}$$

ARRANJO	PGelétrica kWh/a	T _{aplicada} R\$	Receita R\$/a
DP-LAC-DL-GAS	1.409.546,67	0,34	475.876,02
UASB-LAC-GAS	1.409.876,00	0,34	475.987,21

T_{aplicada} = Tarifa média ponderada aplicada (Fonte: Probiogás 2015)

Receita = Receita anual gerada

Fonte: Adaptado, Probiogás (2015).

6.4 Fluxos de caixa no cenário base

Para fazer a comparação de viabilidade econômica, foram feitas simulações de fluxo de caixa para um tempo de 25 anos, assim fica claro que nos totais gastos ao longo desse tempo, os arranjos sem aproveitamento de biogás tem custos mais elevados, pois estes não têm receita alguma para contrapor os gastos com operação e manutenção OPEX.

Tabela 18 – Fluxo de caixa arranjo DP-LAC-DL.

Considerados: Inflação monetária 6,5% a.a; Reajuste tarifa de energia 2% a.a.

FLUXO DE CAIXA COM ARRANJO DIGESTOR DE LODO SEM APROVEITAMENTO DO BIOGÁS					
ANO	CAPEX	OPEX		RECEITA	TOTAL
		ENERGIA C/ DESC.	DEMAIS OPEX		
0	-R\$ 9.628.837,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 9.628.837,00
1	R\$ 0,00	-R\$ 667.102,92	-R\$ 892.456,97	R\$ 0,00	-R\$ 1.559.559,89
2	R\$ 0,00	-R\$ 724.673,90	-R\$ 950.466,67	R\$ 0,00	-R\$ 1.675.140,58
3	R\$ 0,00	-R\$ 787.213,26	-R\$ 1.012.247,01	R\$ 0,00	-R\$ 1.799.460,27
4	R\$ 0,00	-R\$ 855.149,76	-R\$ 1.078.043,06	R\$ 0,00	-R\$ 1.933.192,83
5	R\$ 0,00	-R\$ 928.949,19	-R\$ 1.148.115,86	R\$ 0,00	-R\$ 2.077.065,05
6	R\$ 0,00	-R\$ 1.009.117,50	-R\$ 1.222.743,39	R\$ 0,00	-R\$ 2.231.860,90
7	R\$ 0,00	-R\$ 1.096.204,34	-R\$ 1.302.221,72	R\$ 0,00	-R\$ 2.398.426,06
8	-R\$ 152.034,00	-R\$ 1.190.806,78	-R\$ 1.386.866,13	R\$ 0,00	-R\$ 2.729.706,90
9	R\$ 0,00	-R\$ 1.293.573,40	-R\$ 1.477.012,43	R\$ 0,00	-R\$ 2.770.585,83
10	-R\$ 4.190.117,00	-R\$ 1.405.208,79	-R\$ 1.573.018,23	R\$ 0,00	-R\$ 7.168.344,02
11	R\$ 0,00	-R\$ 1.526.478,31	-R\$ 1.675.264,42	R\$ 0,00	-R\$ 3.201.742,72
12	R\$ 0,00	-R\$ 1.658.213,38	-R\$ 1.784.156,61	R\$ 0,00	-R\$ 3.442.369,99
13	R\$ 0,00	-R\$ 1.801.317,20	-R\$ 1.900.126,78	R\$ 0,00	-R\$ 3.701.443,98
14	R\$ 0,00	-R\$ 1.956.770,87	-R\$ 2.023.635,03	R\$ 0,00	-R\$ 3.980.405,90
15	-R\$ 2.331.450,00	-R\$ 2.125.640,20	-R\$ 2.155.171,30	R\$ 0,00	-R\$ 6.612.261,50
16	-R\$ 251.616,00	-R\$ 2.309.082,95	-R\$ 2.295.257,44	R\$ 0,00	-R\$ 4.855.956,39
17	R\$ 0,00	-R\$ 2.508.356,81	-R\$ 2.444.449,17	R\$ 0,00	-R\$ 4.952.805,98
18	R\$ 0,00	-R\$ 2.724.828,00	-R\$ 2.603.338,37	R\$ 0,00	-R\$ 5.328.166,37
19	R\$ 0,00	-R\$ 2.959.980,66	-R\$ 2.772.555,36	R\$ 0,00	-R\$ 5.732.536,02
20	-R\$ 11.382.024,00	-R\$ 3.215.426,99	-R\$ 2.952.771,46	R\$ 0,00	-R\$ 17.550.222,44
21	R\$ 0,00	-R\$ 3.492.918,34	-R\$ 3.144.701,60	R\$ 0,00	-R\$ 6.637.619,94
22	R\$ 0,00	-R\$ 3.794.357,19	-R\$ 3.349.107,21	R\$ 0,00	-R\$ 7.143.464,40
23	R\$ 0,00	-R\$ 4.121.810,21	-R\$ 3.566.799,18	R\$ 0,00	-R\$ 7.688.609,39
24	-R\$ 416.423,00	-R\$ 4.477.522,43	-R\$ 3.798.641,12	R\$ 0,00	-R\$ 8.692.586,56
25	-R\$ 13.228.177,00	-R\$ 4.863.932,62	-R\$ 4.045.552,80	R\$ 0,00	-R\$ 22.137.662,42
TOTAL GASTO AO LONGO DOS 25 ANOS			=	-R\$ 147.630.033,30	

Fonte: Adaptado, Probiogás (2015).

A tabela a seguir (tabela 19), demonstra que comparado ao arranjo sem aproveitamento do biogás (tabela 18), os gastos com CAPEX são mais elevados mas nem esse fator faz com que o aproveitamento do biogás seja inviável, ao longo de 25 anos a economia fica em aproximadamente 12%.

Tabela 19 – Fluxo de caixa arranjo DP-LAC-DL-GAS.

Considerados: Inflação monetária 6,5% a.a; Reajuste tarifa de energia 2% a.a.

FLUXO DE CAIXA COM ARRANJO DIGESTOR DE LODO COM APROVEITAMENTO DO BIOGÁS					
ANO	CAPEX	OPEX		RECEITA	TOTAL
		ENERGIA C/ DESC.	DEMAIS OPEX		
0	-R\$ 11.662.317,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 11.662.317,00
1	R\$ 0,00	-R\$ 667.102,92	-R\$ 1.055.696,77	R\$ 516.944,12	-R\$ 1.205.855,57
2	R\$ 0,00	-R\$ 724.673,90	-R\$ 1.124.317,06	R\$ 561.556,40	-R\$ 1.287.434,57
3	R\$ 0,00	-R\$ 787.213,26	-R\$ 1.197.397,67	R\$ 610.018,72	-R\$ 1.374.592,22
4	R\$ 0,00	-R\$ 855.149,76	-R\$ 1.275.228,52	R\$ 662.663,33	-R\$ 1.467.714,96
5	R\$ 0,00	-R\$ 928.949,19	-R\$ 1.358.118,38	R\$ 719.851,18	-R\$ 1.567.216,39
6	R\$ 0,00	-R\$ 1.009.117,50	-R\$ 1.446.396,07	R\$ 781.974,33	-R\$ 1.673.539,24
7	R\$ 0,00	-R\$ 1.096.204,34	-R\$ 1.540.411,82	R\$ 849.458,72	-R\$ 1.787.157,44
8	-R\$ 371.581,00	-R\$ 1.190.806,78	-R\$ 1.640.538,58	R\$ 922.767,00	-R\$ 2.280.159,36
9	R\$ 0,00	-R\$ 1.293.573,40	-R\$ 1.747.173,59	R\$ 1.002.401,80	-R\$ 2.038.345,20
10	-R\$ 4.628.784,00	-R\$ 1.405.208,79	-R\$ 1.860.739,88	R\$ 1.088.909,07	-R\$ 6.805.823,59
11	R\$ 0,00	-R\$ 1.526.478,31	-R\$ 1.981.687,97	R\$ 1.182.881,92	-R\$ 2.325.284,35
12	R\$ 0,00	-R\$ 1.658.213,38	-R\$ 2.110.497,69	R\$ 1.284.964,64	-R\$ 2.483.746,43
13	R\$ 0,00	-R\$ 1.801.317,20	-R\$ 2.247.680,03	R\$ 1.395.857,08	-R\$ 2.653.140,15
14	R\$ 0,00	-R\$ 1.956.770,87	-R\$ 2.393.779,24	R\$ 1.516.319,55	-R\$ 2.834.230,56
15	-R\$ 6.274.286,89	-R\$ 2.125.640,20	-R\$ 2.549.374,89	R\$ 1.647.177,93	-R\$ 9.302.124,05
16	-R\$ 614.965,00	-R\$ 2.309.082,95	-R\$ 2.715.084,26	R\$ 1.789.329,38	-R\$ 3.849.802,82
17	R\$ 0,00	-R\$ 2.508.356,81	-R\$ 2.891.564,73	R\$ 1.943.748,51	-R\$ 3.456.173,03
18	R\$ 0,00	-R\$ 2.724.828,00	-R\$ 3.079.516,44	R\$ 2.111.494,00	-R\$ 3.692.850,44
19	R\$ 0,00	-R\$ 2.959.980,66	-R\$ 3.279.685,01	R\$ 2.293.715,94	-R\$ 3.945.949,73
20	-R\$ 12.677.822,00	-R\$ 3.215.426,99	-R\$ 3.492.864,53	R\$ 2.491.663,62	-R\$ 16.894.449,90
21	R\$ 0,00	-R\$ 3.492.918,34	-R\$ 3.719.900,73	R\$ 2.706.694,19	-R\$ 4.506.124,87
22	R\$ 0,00	-R\$ 3.794.357,19	-R\$ 3.961.694,28	R\$ 2.940.281,90	-R\$ 4.815.769,56
23	R\$ 0,00	-R\$ 4.121.810,21	-R\$ 4.219.204,40	R\$ 3.194.028,23	-R\$ 5.146.986,39
24	-R\$ 1.017.764,00	-R\$ 4.477.522,43	-R\$ 4.493.452,69	R\$ 3.469.672,86	-R\$ 6.519.066,26
25	-R\$ 18.595.217,00	-R\$ 4.863.932,62	-R\$ 4.785.527,11	R\$ 3.769.105,63	-R\$ 24.475.571,10
TOTAL GASTO AO LONGO DOS 25 ANOS			=	-R\$ 130.051.425,18	

Fonte: Adaptado, Probiogás (2015).

Os arranjos com reatores UASB obtiveram ao longo dos 25 anos valores totais mais baixos, isso devido ao fato de que os custos com CAPEX e OPEX dos arranjos com digestores de lodo serem mais elevados, ou seja, a opção com reatores UASB é mais viável técnico e economicamente. Ao longo dos 25 anos, a economia do sistema com digestores de lodo comparada aos reatores UASB, ambos com aproveitamento do biogás, fica acima de 30%.

Tabela 20 – Fluxo de caixa arranjo UASB-LAC.

Considerados: Inflação monetária 6.5% a.a: Reajuste tarifa de energia 2% a.a.

FLUXO DE CAIXA COM ARRANJO REATOR UASB SEM APROVEITAMENTO DO BIOGÁS					
ANO	CAPEX	OPEX		RECEITA	TOTAL
		ENERGIA C/ DESC.	DEMAIS OPEX		
0	-R\$ 6.882.322,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 6.882.322,00
1	R\$ 0,00	-R\$ 445.909,68	-R\$ 685.460,46	R\$ 0,00	-R\$ 1.131.370,15
2	R\$ 0,00	-R\$ 484.391,69	-R\$ 730.015,39	R\$ 0,00	-R\$ 1.214.407,08
3	R\$ 0,00	-R\$ 526.194,69	-R\$ 777.466,39	R\$ 0,00	-R\$ 1.303.661,08
4	R\$ 0,00	-R\$ 571.605,29	-R\$ 828.001,71	R\$ 0,00	-R\$ 1.399.607,00
5	R\$ 0,00	-R\$ 620.934,83	-R\$ 881.821,82	R\$ 0,00	-R\$ 1.502.756,65
6	R\$ 0,00	-R\$ 674.521,50	-R\$ 939.140,24	R\$ 0,00	-R\$ 1.613.661,74
7	R\$ 0,00	-R\$ 732.732,71	-R\$ 1.000.184,36	R\$ 0,00	-R\$ 1.732.917,07
8	-R\$ 366.108,00	-R\$ 795.967,54	-R\$ 1.065.196,34	R\$ 0,00	-R\$ 2.227.271,88
9	R\$ 0,00	-R\$ 864.659,54	-R\$ 1.134.434,10	R\$ 0,00	-R\$ 1.999.093,64
10	-R\$ 3.718.270,00	-R\$ 939.279,66	-R\$ 1.208.172,32	R\$ 0,00	-R\$ 5.865.721,98
11	R\$ 0,00	-R\$ 1.020.339,49	-R\$ 1.286.703,52	R\$ 0,00	-R\$ 2.307.043,01
12	R\$ 0,00	-R\$ 1.108.394,79	-R\$ 1.370.339,25	R\$ 0,00	-R\$ 2.478.734,04
13	R\$ 0,00	-R\$ 1.204.049,26	-R\$ 1.459.411,30	R\$ 0,00	-R\$ 2.663.460,56
14	R\$ 0,00	-R\$ 1.307.958,71	-R\$ 1.554.273,03	R\$ 0,00	-R\$ 2.862.231,75
15	R\$ 0,00	-R\$ 1.420.835,55	-R\$ 1.655.300,78	R\$ 0,00	-R\$ 3.076.136,33
16	-R\$ 605.906,00	-R\$ 1.543.453,66	-R\$ 1.762.895,33	R\$ 0,00	-R\$ 3.912.254,99
17	R\$ 0,00	-R\$ 1.676.653,71	-R\$ 1.877.483,53	R\$ 0,00	-R\$ 3.554.137,24
18	R\$ 0,00	-R\$ 1.821.348,93	-R\$ 1.999.519,96	R\$ 0,00	-R\$ 3.820.868,88
19	R\$ 0,00	-R\$ 1.978.531,34	-R\$ 2.129.488,75	R\$ 0,00	-R\$ 4.108.020,09
20	-R\$ 9.330.294,00	-R\$ 2.149.278,59	-R\$ 2.267.905,52	R\$ 0,00	-R\$ 13.747.478,11
21	R\$ 0,00	-R\$ 2.334.761,33	-R\$ 2.415.319,38	R\$ 0,00	-R\$ 4.750.080,72
22	R\$ 0,00	-R\$ 2.536.251,24	-R\$ 2.572.315,14	R\$ 0,00	-R\$ 5.108.566,38
23	R\$ 0,00	-R\$ 2.755.129,72	-R\$ 2.739.515,62	R\$ 0,00	-R\$ 5.494.645,34
24	-R\$ 1.002.772,00	-R\$ 2.992.897,41	-R\$ 2.917.584,14	R\$ 0,00	-R\$ 6.913.253,56
25	-R\$ 9.567.652,00	-R\$ 3.251.184,46	-R\$ 3.107.227,11	R\$ 0,00	-R\$ 15.926.063,57
TOTAL GASTO AO LONGO DOS 25 ANOS			=	-R\$ 107.595.764,84	

Fonte: Adaptado, Probiogás (2015).

A tabela abaixo (tabela 21), demonstra que comparado ao arranjo sem aproveitamento do biogás (tabela 20), os gastos com CAPEX são mais elevados mas nem esse fator faz com que o aproveitamento do biogás seja inviável, ao longo de 25 anos a economia fica em mais de 16%.

Tabela 21 – Fluxo de caixa arranjo UASB-LAC-GAS.

Considerados: Inflação monetária 6,5% a.a; Reajuste tarifa de energia 2% a.a.

FLUXO DE CAIXA COM ARRANJO REATOR UASB COM APROVEITAMENTO DO BIOGÁS					
ANO	CAPEX	OPEX		RECEITA	TOTAL
		ENERGIA C/ DESC.	DEMAIS OPEX		
0	-R\$ 8.915.802,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 8.915.802,00
1	R\$ 0,00	-R\$ 445.909,68	-R\$ 853.096,19	R\$ 517.064,91	-R\$ 781.940,97
2	R\$ 0,00	-R\$ 484.391,69	-R\$ 908.547,45	R\$ 561.687,61	-R\$ 831.251,52
3	R\$ 0,00	-R\$ 526.194,69	-R\$ 967.603,03	R\$ 610.161,25	-R\$ 883.636,47
4	R\$ 0,00	-R\$ 571.605,29	-R\$ 1.030.497,23	R\$ 662.818,16	-R\$ 939.284,35
5	R\$ 0,00	-R\$ 620.934,83	-R\$ 1.097.479,55	R\$ 720.019,37	-R\$ 998.395,00
6	R\$ 0,00	-R\$ 674.521,50	-R\$ 1.168.815,72	R\$ 782.157,04	-R\$ 1.061.180,18
7	R\$ 0,00	-R\$ 732.732,71	-R\$ 1.244.788,74	R\$ 849.657,20	-R\$ 1.127.864,25
8	-R\$ 585.654,00	-R\$ 795.967,54	-R\$ 1.325.700,01	R\$ 922.982,61	-R\$ 1.784.338,94
9	R\$ 0,00	-R\$ 864.659,54	-R\$ 1.411.870,51	R\$ 1.002.636,01	-R\$ 1.273.894,04
10	-R\$ 4.156.937,00	-R\$ 939.279,66	-R\$ 1.503.642,09	R\$ 1.089.163,50	-R\$ 5.510.695,25
11	R\$ 0,00	-R\$ 1.020.339,49	-R\$ 1.601.378,82	R\$ 1.183.158,31	-R\$ 1.438.560,01
12	R\$ 0,00	-R\$ 1.108.394,79	-R\$ 1.705.468,45	R\$ 1.285.264,87	-R\$ 1.528.598,37
13	R\$ 0,00	-R\$ 1.204.049,26	-R\$ 1.816.323,90	R\$ 1.396.183,23	-R\$ 1.624.189,93
14	R\$ 0,00	-R\$ 1.307.958,71	-R\$ 1.934.384,95	R\$ 1.516.673,84	-R\$ 1.725.669,82
15	-R\$ 3.942.837,00	-R\$ 1.420.835,55	-R\$ 2.060.119,97	R\$ 1.647.562,80	-R\$ 5.776.229,73
16	-R\$ 969.255,00	-R\$ 1.543.453,66	-R\$ 2.194.027,77	R\$ 1.789.747,46	-R\$ 2.916.988,97
17	R\$ 0,00	-R\$ 1.676.653,71	-R\$ 2.336.639,58	R\$ 1.944.202,67	-R\$ 2.069.090,62
18	R\$ 0,00	-R\$ 1.821.348,93	-R\$ 2.488.521,15	R\$ 2.111.987,36	-R\$ 2.197.882,71
19	R\$ 0,00	-R\$ 1.978.531,34	-R\$ 2.650.275,02	R\$ 2.294.251,87	-R\$ 2.334.554,49
20	-R\$ 10.626.091,00	-R\$ 2.149.278,59	-R\$ 2.822.542,90	R\$ 2.492.245,81	-R\$ 13.105.666,69
21	R\$ 0,00	-R\$ 2.334.761,33	-R\$ 3.006.008,19	R\$ 2.707.326,62	-R\$ 2.633.442,90
22	R\$ 0,00	-R\$ 2.536.251,24	-R\$ 3.201.398,72	R\$ 2.940.968,91	-R\$ 2.796.681,05
23	R\$ 0,00	-R\$ 2.755.129,72	-R\$ 3.409.489,64	R\$ 3.194.774,52	-R\$ 2.969.844,83
24	-R\$ 1.604.113,00	-R\$ 2.992.897,41	-R\$ 3.631.106,46	R\$ 3.470.483,56	-R\$ 4.757.633,31
25	-R\$ 14.934.692,00	-R\$ 3.251.184,46	-R\$ 3.867.128,38	R\$ 3.769.986,30	-R\$ 18.283.018,55
TOTAL GASTO AO LONGO DOS 25 ANOS			=	-R\$ 90.266.334,96	

Fonte: Adaptado, Probiogás (2015).

6.5 Levantamento do tempo estimado do “Payback”

As tabelas 22 e 23 mostradas a seguir, fazem a estimativa do payback. A partir do momento em que o saldo acumulado ficar positivo então será definido como o tempo estimado do payback.

Tabela 22 – Fluxo de caixa do sistema de aproveitamento do biogás com digestor de lodo.
Considerados: Inflação monetária 6,5% a.a; Reajuste tarifa de energia 2% a.a.

FLUXO DE CAIXA "SISTEMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS" ARRANJO COM DIGESTOR DE LODO						
ANO	CAPEX	OPEX		RECEITA	TOTAL	ACUMULADO
		ENERGIA C/ DESC.	DEMAIS OPEX			
0	-R\$ 2.033.480,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 2.033.480,00	-R\$ 2.033.480,00
1	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 163.239,80	R\$ 516.944,12	R\$ 353.704,32	-R\$ 1.679.775,68
2	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 173.850,39	R\$ 561.556,40	R\$ 387.706,01	-R\$ 1.292.069,67
3	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 185.150,67	R\$ 610.018,72	R\$ 424.868,05	-R\$ 867.201,62
4	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 197.185,46	R\$ 662.663,33	R\$ 465.477,87	-R\$ 401.723,75
5	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 210.002,51	R\$ 719.851,18	R\$ 509.848,66	R\$ 108.124,91
6	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 223.652,68	R\$ 781.974,33	R\$ 558.321,66	R\$ 666.446,57
7	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 238.190,10	R\$ 849.458,72	R\$ 611.268,62	R\$ 1.277.715,18
8	-R\$ 219.547,00	R\$ 0,00	-R\$ 253.672,46	R\$ 922.767,00	R\$ 449.547,55	R\$ 1.727.262,73
9	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 270.161,17	R\$ 1.002.401,80	R\$ 732.240,63	R\$ 2.459.503,36
10	-R\$ 438.667,00	R\$ 0,00	-R\$ 287.721,64	R\$ 1.088.909,07	R\$ 362.520,43	R\$ 2.822.023,79
11	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 306.423,55	R\$ 1.182.881,92	R\$ 876.458,38	R\$ 3.698.482,17
12	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 326.341,08	R\$ 1.284.964,64	R\$ 958.623,55	R\$ 4.657.105,72
13	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 347.553,25	R\$ 1.395.857,08	R\$ 1.048.303,83	R\$ 5.705.409,55
14	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 370.144,21	R\$ 1.516.319,55	R\$ 1.146.175,34	R\$ 6.851.584,89
15	-R\$ 3.942.836,89	R\$ 0,00	-R\$ 394.203,59	R\$ 1.647.177,93	-R\$ 2.689.862,55	R\$ 4.161.722,34
16	-R\$ 363.349,00	R\$ 0,00	-R\$ 419.826,82	R\$ 1.789.329,38	R\$ 1.006.153,56	R\$ 5.167.875,90
17	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 447.115,56	R\$ 1.943.748,51	R\$ 1.496.632,95	R\$ 6.664.508,85
18	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 476.178,07	R\$ 2.111.494,00	R\$ 1.635.315,93	R\$ 8.299.824,78
19	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 507.129,65	R\$ 2.293.715,94	R\$ 1.786.586,29	R\$ 10.086.411,07
20	-R\$ 1.295.798,00	R\$ 0,00	-R\$ 540.093,07	R\$ 2.491.663,62	R\$ 655.772,55	R\$ 10.742.183,61
21	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 575.199,12	R\$ 2.706.694,19	R\$ 2.131.495,07	R\$ 12.873.678,68
22	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 612.587,07	R\$ 2.940.281,90	R\$ 2.327.694,83	R\$ 15.201.373,51
23	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 652.405,23	R\$ 3.194.028,23	R\$ 2.541.623,00	R\$ 17.742.996,51
24	-R\$ 601.341,00	R\$ 0,00	-R\$ 694.811,57	R\$ 3.469.672,86	R\$ 2.173.520,30	R\$ 19.916.516,81
25	-R\$ 5.367.040,00	R\$ 0,00	-R\$ 739.974,32	R\$ 3.769.105,63	-R\$ 2.337.908,69	R\$ 17.578.608,12
TOTAL DE LUCRO AO LONGO DOS 25 ANOS				=	R\$ 17.578.608,12	

Como pode ser visto na tabela anterior (tabela 22) e na tabela a seguir (tabela 23), as estimativas de payback acontecem no 5º ano da implantação do sistema, e ao fim dos 25 anos simulados esses rendem cerca de R\$ 17 milhões, rendimento esse que não acontece nas ETEs sem aproveitamento energético do biogás.

Tabela 23 – Fluxo de caixa do sistema de aproveitamento do biogás com reator UASB.
Considerados: Inflação monetária 6,5% a.a; Reajuste tarifa de energia 2% a.a.

FLUXO DE CAIXA "SISTEMA DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS" ARRANJO COM REATOR UASB						
ANO	CAPEX	OPEX		RECEITA	TOTAL	ACUMULADO
		ENERGIA C/ DESC.	DEMAIS OPEX			
0	-R\$ 2.033.480,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 2.033.480,00	-R\$ 2.033.480,00
1	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 167.635,73	R\$ 517.064,91	R\$ 349.429,18	-R\$ 1.684.050,82
2	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 178.532,05	R\$ 561.687,61	R\$ 383.155,56	-R\$ 1.300.895,27
3	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 190.136,63	R\$ 610.161,25	R\$ 420.024,61	-R\$ 880.870,65
4	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 202.495,52	R\$ 662.818,16	R\$ 460.322,65	-R\$ 420.548,00
5	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 215.657,72	R\$ 720.019,37	R\$ 504.361,65	R\$ 83.813,64
6	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 229.675,48	R\$ 782.157,04	R\$ 552.481,57	R\$ 636.295,21
7	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 244.604,38	R\$ 849.657,20	R\$ 605.052,81	R\$ 1.241.348,03
8	-R\$ 219.546,00	R\$ 0,00	-R\$ 260.503,67	R\$ 922.982,61	R\$ 442.932,95	R\$ 1.684.280,97
9	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 277.436,41	R\$ 1.002.636,01	R\$ 725.199,61	R\$ 2.409.480,58
10	-R\$ 438.667,00	R\$ 0,00	-R\$ 295.469,77	R\$ 1.089.163,50	R\$ 355.026,73	R\$ 2.764.507,30
11	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 314.675,31	R\$ 1.183.158,31	R\$ 868.483,00	R\$ 3.632.990,31
12	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 335.129,20	R\$ 1.285.264,87	R\$ 950.135,67	R\$ 4.583.125,98
13	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 356.912,60	R\$ 1.396.183,23	R\$ 1.039.270,63	R\$ 5.622.396,61
14	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 380.111,92	R\$ 1.516.673,84	R\$ 1.136.561,92	R\$ 6.758.958,53
15	-R\$ 3.942.837,00	R\$ 0,00	-R\$ 404.819,19	R\$ 1.647.562,80	-R\$ 2.700.093,40	R\$ 4.058.865,13
16	-R\$ 363.349,00	R\$ 0,00	-R\$ 431.132,44	R\$ 1.789.747,46	R\$ 995.266,02	R\$ 5.054.131,16
17	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 459.156,05	R\$ 1.944.202,67	R\$ 1.485.046,62	R\$ 6.539.177,78
18	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 489.001,19	R\$ 2.111.987,36	R\$ 1.622.986,17	R\$ 8.162.163,94
19	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 520.786,27	R\$ 2.294.251,87	R\$ 1.773.465,60	R\$ 9.935.629,54
20	-R\$ 1.295.797,00	R\$ 0,00	-R\$ 554.637,38	R\$ 2.492.245,81	R\$ 641.811,43	R\$ 10.577.440,97
21	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 590.688,81	R\$ 2.707.326,62	R\$ 2.116.637,81	R\$ 12.694.078,78
22	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 629.083,58	R\$ 2.940.968,91	R\$ 2.311.885,33	R\$ 15.005.964,11
23	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 669.974,01	R\$ 3.194.774,52	R\$ 2.524.800,51	R\$ 17.530.764,62
24	-R\$ 601.341,00	R\$ 0,00	-R\$ 713.522,32	R\$ 3.470.483,56	R\$ 2.155.620,24	R\$ 19.686.384,86
25	-R\$ 5.367.040,00	R\$ 0,00	-R\$ 759.901,27	R\$ 3.769.986,30	-R\$ 2.356.954,98	R\$ 17.329.429,88
TOTAL DE LUCRO AO LONGO DOS 25 ANOS				=	R\$ 17.329.429,88	

Segundo as simulações, esse sistema fica comprovadamente sustentável financeiramente, uma vez que depois do tempo de payback, o saldo acumulado não volta à ser negativo, nem mesmo no 25º ano, quando esse sofre a maior reforma.

7 CONCLUSÃO

Ficou comprovado pelo PROBIOGÁS que o aproveitamento energético do biogás oriundo de estações de tratamento de esgotos é viável tanto tecnicamente quanto economicamente, visto que esse sistema já é muito difundido na Alemanha, e que já existem algumas plantas funcionando no Brasil. Esta situação melhorada depois das resoluções da ANEEL que viabilizaram a distribuição da energia elétrica gerada.

Neste programa foram analisados dois arranjos de sistemas distintos de tratamento de esgoto, ambos com o mesmo fim, de gerar energia elétrica aproveitando o biogás produto da decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos esgotos.

Apesar de, no fim das contas ambos os sistemas se provaram capazes de se autosustentar, e de trazer benefícios financeiros para a manutenção da ETE, o aproveitamento energético do biogás se utilizando de reatores UASB saiu com um custo 30% menor do que com digestores de lodo.

Foi possível concluir que dentre os dois arranjos simulados como possíveis alternativas, o arranjo com reatores UASB se sobressaiu, por que os custos para implantação deste se mostraram menores quando comparados aos custos da implantação dos digestores de lodo. Isso se deve ao fato de que para os arranjos com digestores de lodo é necessário que se tenham decantadores primários, e seus custos de operação são maiores também, em função dos equipamentos encontrados nos digestores de lodo, como os misturadores por exemplo, que demandam mais energia para a operação e consequentemente mais gastos com manutenção.

Para melhor ilustrar o tempo de retorno do investimento “payback”, foi feita uma simulação, e o resultado foi um payback de 5 anos, ou seja, com 5 anos de funcionamento, as adaptações feitas em uma ETE para que essa produza energia

elétrica se paga. Fazendo assim com que esse sistema além de viável, também seja sustentável financeiramente.

Além dos benefícios financeiros, o aproveitamento do biogás também vem a ser um aliado no combate do efeito estufa, seja nos queimadores ou nos motogeradores, ocorre a transformação do gás metano em dióxido de carbono, que por sua vez é menos nocivo ao meio ambiente, portanto, diminui a poluição atmosférica. Sendo assim uma alternativa ambientalmente mais sustentável.

Os estudos tiveram como base o ano 2015, ano em que a inflação foi de 10,67%, já em 2016 a taxa de inflação anual foi de 6,29%, a mais baixa desde 2013 segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Se a inflação continuar em queda nos anos seguintes acarretará em um sistema ainda mais vantajoso, as variações nos custos serão menores.

Por fim, todos os objetivos propostos por esse trabalho foram alcançados, ficando assim comprovado que o aproveitamento energético do biogás de ETE é viável e sustentável financeiramente e ambientalmente. Se esse sistema for mais difundido no Brasil, então o biogás será uma grande fonte de energia renovável a ser incluída na matriz energética brasileira.

8 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Estudar a utilização do biogás oriundo dos resíduos das atividades agrícolas, pecuárias e da agroindústria;
- Analisar o processo de micro geração e aproveitamento doméstico de biogás;
- Demonstrar a utilização energética do biogás gerado a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos;
- Estudar o biometano como combustível veicular;
- Analisar o potencial econômico adicional pelo uso da energia térmica para secagem do lodo;

9 BIBLIOGRAFIA

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto/ Probiogás**; Organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015^a.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para Brasil/Probiogás**; Organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Autores: Carolina Cabral ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015d.

BRASIL – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/ Probiogás. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2016b. 1 ed. 145 p.

PROBIOGÁS. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; CHERNICHARO C.A.L. **Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil**. 28^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do**

biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Rio de Janeiro/RJ, 2015.

CABRAL, B. G. C.. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - UFSC. Florianópolis. 2016.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRE'VE, J.; DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, 34, p.755-781, Elsevier, 2008.

PROBIOGAS. **Biogás em ETEs.** Material de Capacitação. 2015.

ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE.** 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

VALENTE, Victor Bustani. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil.** 2015. 198p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ANEEL. **Cadernos Temáticos ANEEL – Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica.** Brasília, 2014.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>>. Acesso em: 10/06/2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 167, de 10 de outubro de 2005.** Disponível em:

< <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2005167.pdf>>. Acesso em: 10/06/2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 427, de 22 de fevereiro de 2011**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2011427.pdf>>. Acesso em: 10/06/2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf> >. Acesso em: 10/06/2017.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 10/06/2017.

ANEEL. **Fontes de energia elétrica no Brasil** . Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Fontes+de+Energia+no+Brasil/2eb48f5c-cc7f-4f63-867e-b2a4f3603418?version=1.0>>. Acesso em: 25/05/2017.

ANEEL. **Fontes de energia elétrica no Brasil** . Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Renov%C3%A1veis+e+N%C3%A3o+Renov%C3%A1veis/aba3cfc6-a27f-a7af-6cac-1d859a2f0d1d?version=1.1>>. Acesso em: 25/05/2017.

ACS CAERN. **Tratamento de esgoto** . Disponível em: < <http://www.caern.com.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12037&ACT=null&PAGE=0&PARM=null&LBL=null>>. Acesso em: 25/05/2017.

BISHEN. **Decantadores primários** . Disponível em: < <http://www.bishenambiental.com.br/decantadores-primarios>>. Acesso em: 26/05/2017.

OMNIA. **Decantadores primários gravidade** . Disponível em: <http://omniawater.es/decantador-primario-gravedad/>>. Acesso em: 26/05/2017

EFLUENTES. **Galeria de fotos** . Disponível em: <<http://www.efluentes.ind.br/fotos.htm>>. Acesso em: 27/05/2017

CONSERV. **Estação de tratamento de esgoto ETE**. Disponível em: <http://conserveng.com.br/estacao-de-tratamento-de-esgoto-ete/>>. Acesso em: 27/05/2017

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico**. 2011. 173p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209 – **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**, 2011. 53 p.

SABESP. **Tratamentos de esgotos** . Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=49>>. Acesso em: 30/05/2017.

SUSTENTARE. **Geração de energia através do biogás** . Disponível em: < <http://www.sustentaresaneamento.com.br/geracao-de-energia/>>. Acesso em: 25/06/2017.

ANTONIO LIMA. **Geração de energia elétrica**. Disponível em: < <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/combust%C3%ADveis.htm> >. Acesso em: 29/06/2017.

BCB. **Tabela Metas e Resultados**. Disponível em: < <http://www.bcb.gov.br/Pec/metas/TabelaMetaseResultados.pdf>>. Acesso em: 30/06/2017.

Anay Cury e Matheus Rodrigues. **Inflação oficial fica em 10,67% em 2015, a maior desde 2002**.

Disponível em: < <http://www.bcb.gov.br/Pec/metas/TabelaMetaseResultados.pdf>>. Acesso em: 30/06/2017.

KARLSSON, TOMMY. **Manual básico de biogás**. ed. Da Univates: Lajeado, RS, Brasil, 2014. 69 p.

ANEXO I – CÁLCULOS PARA OBTENÇÃO DA VAZÃO DO BIOGÁS

Tabela 24 – Características do esgoto e vazão de projeto.

PARÂMETRO	VALOR	OBSERVAÇÃO
População Atendida (hab.)	100.000	Adotado
Contribuição <i>per capita</i> (l/hab.d)	160	Adotado
Coeficiente de vazão máxima diária (k1)	1,2	Adotado
Coeficiente de vazão máxima horária (k2)	1,5	Adotado
DBO (Kg/d)	5.400	$Pop \times [54 \text{ g/hab.dia}]/1000$
DQO (Kg/d)	11.000	$Pop \times [110 \text{ g/hab.dia}]/1000$
NTK (Kg/d)	1.100	$Pop \times [11 \text{ g/hab.dia}]/1000$
ST (Kg/d)	6.000	$Pop \times [60 \text{ g/hab.dia}]/1000$
$Q_{\text{média}}$ (m³/d)	16.000	$[Pop \times C]/1000$
$Q_{\text{infiltração}}$ (m³/d)	4.800	Adotado
$Q_{\text{máxima}}$ (m³/d)	28.800	$Q_{\text{esgoto}} \times [k1] \times [k2]$
Q_{total} (m³/d)	33.600	$Q_{\text{máxima}} + Q_{\text{infiltração}}$
i Conforme NBR 12.209 (ABNT, 2011)		

Fonte: Brasil, 2015

Para encontrar as vazões do biogás, primeiramente deve ser feito o dimensionamento dos digestores de lodo e os reatores UASB. Seguem os cálculos abaixo.

Digestor de lodo:

Tabela 25 – Resultados do decantador primário.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Unidades	-	2
Diâmetro mínimo	m	10,64
Área mínima	m ²	177,78
Altura útil	m	3,50
Altura livre	m	0,50
Altura total	m	4,00
Volume parcial	m ³	661,73
Volume total	m ³	1.323,46
Produção mássica de lodo primário	kg _{ss} /d	3.300,00
Carga DBOs efluente do decantador primário	kg _{DBOs} /d	3.780,00
Carga de sólidos suspensos efluente do decantador primário	kg _{ss} /d	2.700,00
Carga NTK efluente do decantador primário	kg _{NTK} /d	990,00

Fonte: Brasil, 2015

Tabela 26 – Resultados tanque de aeração após decantador primário.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Volume para nitrificação	m ³	6.188
Volume para desnitrificação	m ³	1.667
Volume total	m ³	7.855
Altura útil	m	3,50
Altura total	m	4,00
Área do tanque de aeração total	m ²	2.244
Unidades dos tanques de aeração	-	2
Volume do tanque de aeração parcial	m ³	3.927
Área do tanque de aeração parcial	m ²	1.122
Produção de lodo aeróbio excedente	kg _{ss} /d	2.646
Taxa de transferência de oxigênio teórica	kg _{o₂} /d	4.560
Taxa de transferência de oxigênio prática	kg _{o₂} /d	8.208
Potência instalada para aeração	kW	244,29
Consumo de energia elétrica para aeração	kWh/a	2.139.982

Fonte: Brasil, 2015

A soma dos lodos formados pelo lodo primário e pelo lodo aeróbio excedente resultou em 5.946kg_{ss}/d, e essa quantidade é a despejada na unidade digestora de lodo.

A vazão de lodo pode ser determinada pela equação abaixo.

$$Q_{\text{lodo,misto}} = \frac{(P_{x,DP} + P_{x,LA})}{C_{SS,\text{adensado}}} = \frac{(3.300 \text{ kgss/d} + 2.646 \text{ kgss/d})}{60 \text{ kgss/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo,misto}} = \frac{3.300 \text{ kgss/d}}{60 \text{ kgss/m}^3} = 99,10 \text{ m}^3/\text{d}$$

Onde:

$Q_{\text{lodo,misto}}$ = Vazão de lodo misto afluente ao digestor de lodo em m³/d

$P_{x,DP}$ = Produção de lodo no decantador primário em kgss/d

$P_{x,LA}$ = Produção de lodo no aeróbio excedente em kgss/d

$C_{SS,\text{adensado}}$ = Teor de sólidos em kgss/m³

Segundo Andreoli (2001), o tempo de detenção hidráulica deve ser entre 18 e 25 dias no caso de lodos provenientes de decantação primária com condições mesofílicas nos digestores. Para garantir a eficiência, foi adotado nesse estudo um tempo de detenção hidráulica de 22 dias.

O volume dos digestores anaeróbios de lodo é determinado pela equação abaixo.

$$V_{\text{digestor}} = TDH \cdot Q_{\text{lodo,misto}} = 22\text{d} \cdot 99,10 \text{ m}^3/\text{d} = 2.600 \text{ m}^3$$

Onde:

V_{digestor} = Volume útil dos digestores anaeróbios de lodo em m^3

TDH = Tempo de detenção hidráulica em h

$Q_{\text{lodo,misto}}$ = Vazão de lodo misto afluente ao digestor de lodo em m^3/d

Sendo assim, foram considerados dois digestores de lodo, com volumes úteis de $1.300 m^3$ cada. Foi considerado também que dentre os sólidos 72% destes serão voláteis.

Sólidos Voláteis

$$P_{xv,afl} = (P_{x,DP} + P_{x,LA}) \cdot SSV/SS$$

$$P_{xv,afl} = 5.946 \text{ kgss/d} \cdot 0,72 \text{ kgss/kgssv} = 4.281 \text{ kgssv/C}$$

Sólidos Fixos

$$P_{xf} = (P_{x,DP} + P_{x,LA}) - P_{xv}$$

$$P_{xf} = 5.946 \text{ kgss/d} - 4.281 \text{ kgssv/d} = 1.665 \text{ kgssf/d}$$

A taxa de aplicação de sólidos é calculada da seguinte forma:

$$TAS_{\text{digestor}} = \frac{P_{xv,af}}{V} = \frac{4.281 \text{ kgssv/d}}{2.600 m^3} = 1,65 \text{ kgssv}/(m^3.d)$$

Onde:

$TAS_{digestor}$ = Taxa de aplicação de sólidos voláteis para o digestor [kgssv/m³.d]

$P_{xv,afl}$ = Carga de sólidos voláteis no afluente ao digestor em kgssv/d

$V_{digestor}$ = Volume útil dos digestores anaeróbios de lodo em m³

Foi considerada para esse estudo uma eficiência de 50% (Andreoli, 2007), no que se refere a remoção dos sólidos voláteis na digestão. Os sólidos fixos permanecem.

A distribuição da carga de sólidos efluentes do digestor é calculada da seguinte forma:

Sólidos Voláteis $P_{xv,efl} = (1 - 50\%) \cdot P_{xv,afl} = (1 - 50\%) \cdot 4.281 \text{ kgssv/d}$

$$P_{xv,efl} = 2.140,6 \text{ kgssv/d}$$

Sólidos Fixos $P_{xf,efl} = P_{xf,afl} = 1.665 \text{ kgsF/d}$

Sólidos Totais $P_{x,LA} = P_{xf,efl} + P_{xv,efl} = 3.805 \text{ kgss/d}$

Por fim, a vazão de biogás nos digestores de lodo é estimada a partir dos sólidos voláteis digeridos, a taxa adotada foi de 80% sólidos voláteis digeridos, segue a equação:

$$Q_{biogás} = q_{biogás} \cdot (P_{xv,afl} - P_{xv,efl})$$

$$Q_{\text{biogás}} = 0,8 \text{ m}^3 / \text{kgSV}_{\text{destruído}} \cdot (4.281 - 2.140) \text{ kgSSV/d}$$

$$Q_{\text{biogás}} = 1.712 \text{ m}^3/\text{d}$$

Onde:

$Q_{\text{biogás}}$ = Vazão de biogás gerado em m^3/d

$q_{\text{biogás}}$ = Taxa específica de geração de biogás em $\text{m}^3/\text{kgSV}_{\text{destruído}}$

Reatores UASB:

O volume dos reatores UASB é determinado pela equação abaixo. Sendo levado em conta um tempo de detenção hidráulica de 10 horas, referente à vazão média.

$$V_{\text{UASB}} = \text{TDH} \cdot Q_{\text{méd}} = 10\text{h} \cdot 666,67 \text{ m}^3/\text{h} = 6.667 \text{ m}^3$$

Onde:

V_{UASB} = Volume útil dos reatores UASB em m^3

TDH = Tempo de detenção hidráulica em h

$Q_{\text{méd}}$ = Vazão média em m^3/h

Sendo assim, foram considerados dois reatores UASB, com alturas úteis de 5,50 m e bordas livres de 0,50 m. Com essas dimensões se faz uma área parcial de 606,06 m^2 .

A eficiência relativa à remoção de carga orgânica pode ser calculada da seguinte forma:

$$\eta_{\text{UASB, DBO}} = 1 - 0,70 \cdot \text{TDH}^{-0,50} = 1 - 0,70 \cdot 10\text{h}^{-0,50} = 77,86\%$$

Onde:

$\eta_{\text{UASB, DBO}}$ = Eficiência do reator UASB referente remoção da DBO_5 em %

TDH = Tempo de detenção hidráulica em h

Segundo as recomendações de Chernicharo (2007), foi adotada uma eficiência de 65%, resultando assim em uma concentração de DBO_5 na saída do reator UASB e, conseqüentemente, no afluente ao reator de lodo ativado de 275,00 mg/l, que representa uma carga de 1.890 kgDBO_5/d .

A produção de lodo anaeróbio excedente é calculada conforme a equação a seguir:

$$P_{\text{lodo, anaeróbio}} = Y_{\text{anaerob}} \cdot CA_{\text{DBO5, afl}}$$

$$P_{\text{lodo, anaeróbio}} = 0,36 \text{ kgSS/kgDBO}_5 \cdot 1.890 \text{ kgDBO}_5/\text{d}$$

$$P_{\text{lodo, anaeróbio}} = 1.944 \text{ kgSS/d}$$

Onde:

$P_{\text{lodo, anaeróbio}}$ = Produção de lodo anaeróbio excedente em kgss/d

$Y_{anaerob}$ = Produção de lodo anaeróbio excedente específica em kg_{SS}/kg_{DBO5}

A parcela de DQO convertida em gás metano (DQO_{CH4}) é determinada da seguinte forma:

$$DQO_{CH4} = Q_{méd} \cdot [(S_{DQO,UASB,afluente} - S_{DQO,UASB,efluente}) - Y_{obs} \cdot S_{DQO,UASB,afluente}]$$

$$DQO_{CH4} = 16.000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot [(0,69-0,28) \text{ kg}/\text{m}^3 - 0,21 \cdot 0,69 \text{ kg}/\text{m}^3]$$

$$DQO_{CH4} = 4.290 \text{ kg}_{DQO}/\text{d}$$

Onde:

DQO_{CH4} = parcela de DQO convertida em metano em kg_{DQO}/d

$S_{DQO,UASB,afluente}$ = DQO afluente em kg/m^3

$S_{DQO,UASB,efluente}$ = DQO efluente em kg/m^3

Q_{med} = Contribuição média de esgoto em m^3/d

Y_{obs} = Coef. de produção de sólidos em termos de DQO (adotado 0,21)

O volume de metano produzido é calculado por:

$$Q_{CH4} = \frac{DQO_{CH4}}{K_{(T)}}$$

Sendo:

$$K_{(T)} = \frac{p \cdot K}{R \cdot (273 + T)} = 2,70 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3$$

Onde:

$K(T)$ = Fator de correção para a temperatura operacional do reator $\text{kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3$

p = Pressão atmosférica em atm

K = COD correspondente a um mol de $\text{CH}_4 = 64 \text{ g}_{\text{DQO}}/\text{mol}$

R = Constante universal dos gases

T = Temperatura operacional do reator – adotado 16°C

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{4.290 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{d}^3}{2,70 \text{ kg}_{\text{DQO}}/\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 1.589,67 \text{ m}^3/\text{d}$$

Considerando uma concentração de metano no biogás de 78%, então temos que a vazão de biogás igual a $2.038 \text{ m}^3/\text{d}$. Deve-se também descontar a parcela referente a perdas, que no caso foi de 30%, por fim, há $1.426,63 \text{ m}^3/\text{d}$ tecnicamente disponível.

$$Q_{\text{biogás}} = 1.426,63 \text{ m}^3/\text{d}$$